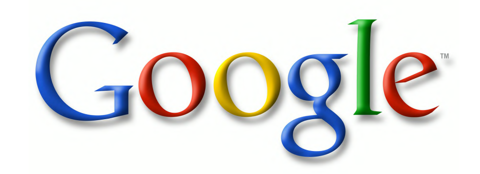
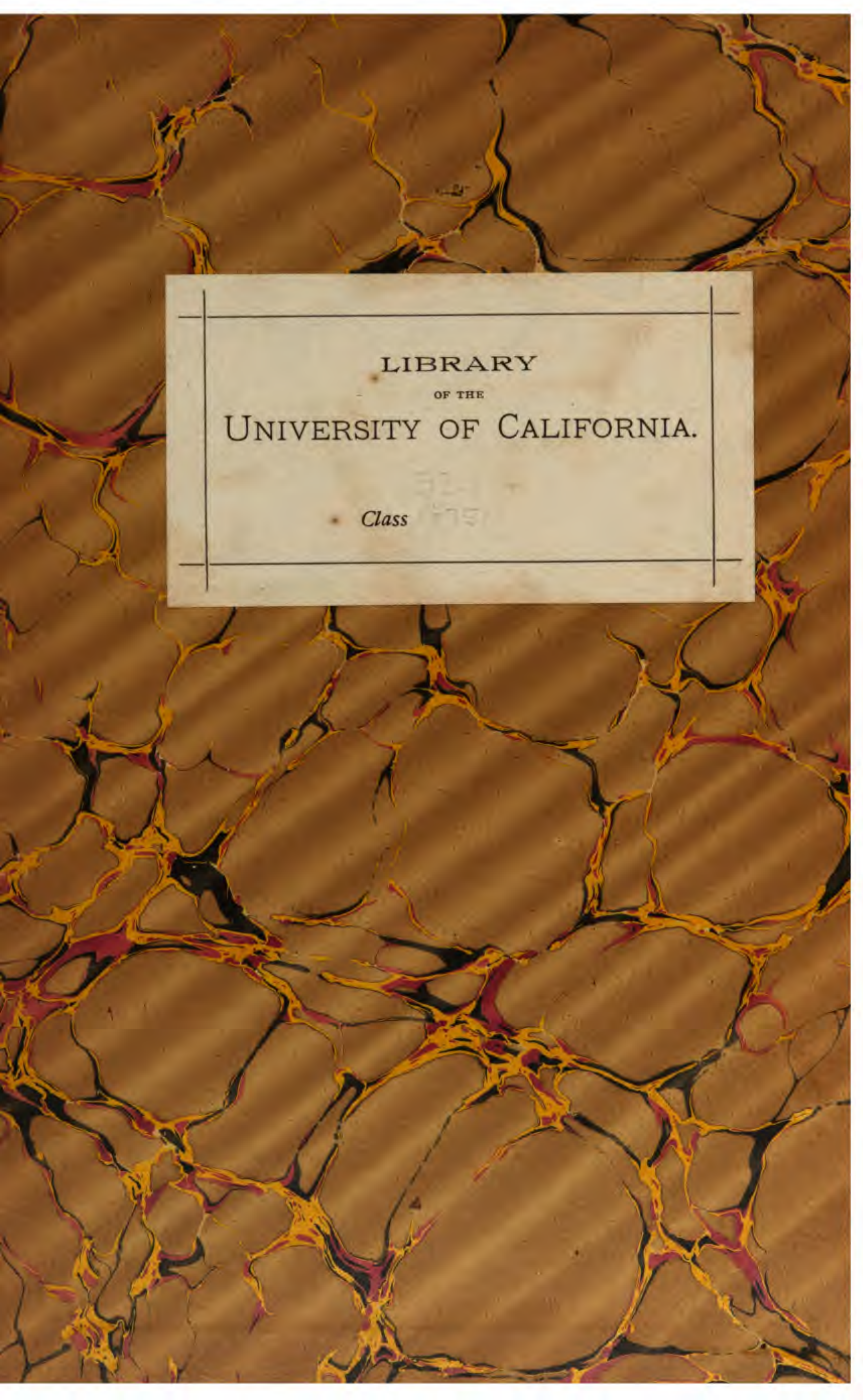
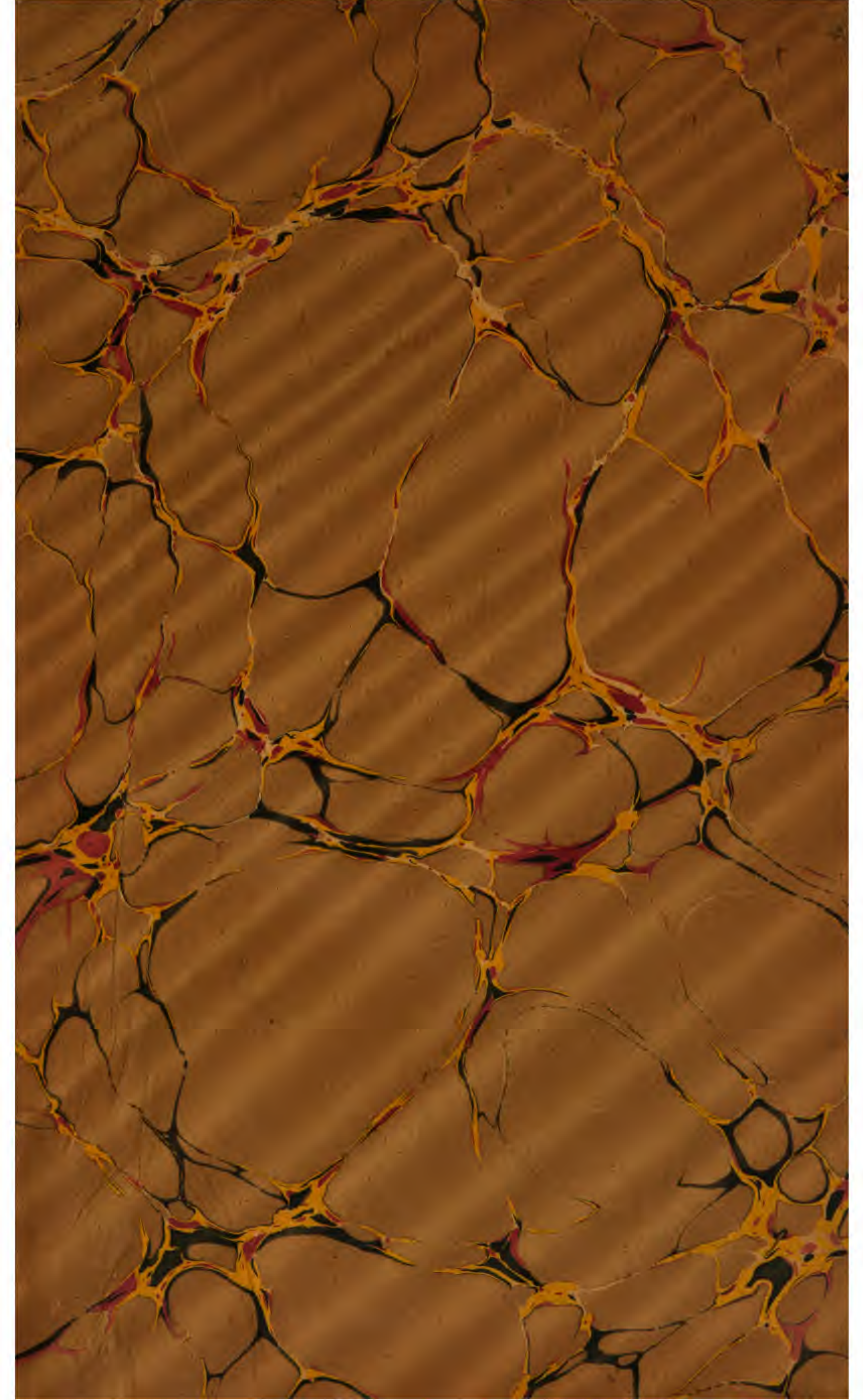





LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF CALIFORNIA.
Class



La Production électrique de l'Acide nitrique

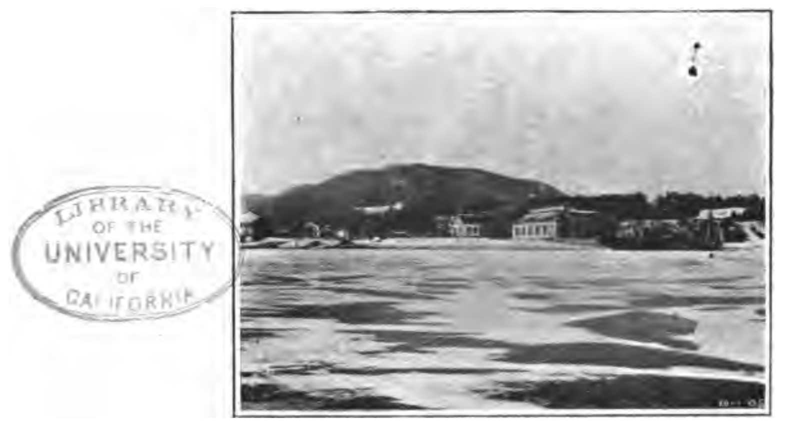
AVEC LES ÉLÉMENTS DE L'AIR

PAR L. GRANDEAU

Professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers
Directeur de la Station agronomique de l'Est

LE NITRATE DE CHAUX ET L'AGRICULTURE
LE FOUR ÉLECTRIQUE BIRKELAND-EYDE
LA FABRIQUE DE NITRATE DE CHAUX DE NOTODDEN

AVEC 7 FIGURES ET 22 SIMILI-GRAVURES



Vue de Notodden et du fjord d'Hitterdal en hiver

PARIS

LIBRAIRIE BERGER-LEVRAULT & Cie
5, RUE DES BEAUX-ARTS, 5

LIBRAIRIE AGRICOLE DE LA MAISON RUSTIQUE
26, RUE JACOB, 26

LIBRAIRIE DU TEMPS
5, BOULEVARD DES ITALIENS, 5

1906



La Production électrique de l'Acide nitrique

AVEC LES ÉLÉMENTS DE L'AIR

trique, des éléments de l'air, pour obtenir l'acide nitrique et produire le nitrate de chaux, aliment azoté par excellence des végétaux.

Je vous demande la permission, avant d'aborder directement mon sujet, de vous présenter quelques considérations sur le rôle de l'azote comme agent de la fertilité du sol et, partant, comme facteur très important de la production des ressources alimentaires du monde.

L'existence de tous les êtres vivants — plantes et animaux — est absolument subordonnée à l'assimilation d'un certain nombre de substances qu'on désigne sous le nom générique d'aliments ; la présence de matières azotées dans les aliments est indispensable, les organismes animaux et végétaux renfermant tous de l'azote.

Ce principe s'y trouve à l'état de combinaison avec le carbone et les éléments de l'eau (oxygène et hydrogène). Les composés azotés, dont l'albumine est le type le plus répandu dans les deux règnes, ne font défaut dans aucun organe végétal ou animal. C'est l'atmosphère qui, directement ou indirectement, fournit à tout organisme vivant l'azote indispensable à son organisation. C'est à l'air, également, que les deux principaux engrais azotés auxquels l'agriculture demande le complément de ses fumures — le nitrate de soude et le sulfate d'ammoniaque — ont emprunté, comme nous le verrons tout à l'heure, le principe auquel ils doivent leur valeur fertilisante.

Un coup d'œil jeté sur les sources de l'alimentation azotée des végétaux semble une introduction naturelle à l'exposé de la grande découverte des savants norvégiens qui sollicite actuellement l'attention des agronomes et des agriculteurs du monde entier.

Jusqu'au dix-neuvième siècle on a ignoré l'origine de l'azote des êtres vivants : on admettait que ceux-ci créent de toute pièce leur substance azotée, sous l'influence de la *force vitale*, mots vides de sens qui servaient à masquer l'ignorance des phénomènes physiques et chimiques qui régissent la vie. D'une part, les expériences de Magendie démontrant qu'en l'absence d'azote dans leurs aliments, les animaux périclitent et meurent aussi vite que ceux qu'on soumet à l'inanition ; de l'autre, les essais de culture de végétaux dans des milieux dépourvus d'azote, révélant la nécessité de ce corps pour

l'alimentation de la plante, établirent l'erreur de la doctrine de la force vitale admise jusque-là. Rien ne vient de rien (*ex nihilo nihil*).

Il est aisé, grâce aux connaissances acquises au cours du siècle dernier, de démontrer que l'azote organique a pour source première, unique, l'atmosphère. Les plantes et les animaux tirent leur azote de l'air : les premières le puisent dans l'air et dans le sol qui, lui-même, l'a emprunté à l'atmosphère. Il est prélevé, par les seconds, dans les aliments végétaux qu'ils consomment ; enfin l'homme — omnivore — trouve dans les matières azotées des plantes et des animaux la totalité de l'azote que renferment ses tissus.

Il est possible de se faire, dans les grandes lignes, une idée de la série des transformations que ce gaz subit, sous l'influence de divers phénomènes naturels, pour devenir un aliment des plantes, et partant, des animaux, dont les premières seules sont capables d'entretenir la vie.

Si l'on se reporte à l'époque géologique où ont apparu, à la surface du globe, les premiers organismes vivants, dont l'origine demeurera sans doute toujours ignorée de nous, deux hypothèses se présentent à l'esprit pour expliquer la formation de la substance azotée vivante : 1° la faculté des êtres inférieurs, premiers occupants de la couche superficielle de la terre, d'assimiler directement l'azote gazeux de l'air, comme nous savons, depuis quelques années, que certaines familles de plantes, au premier rang les légumineuses, en ont le pouvoir ; 2° l'utilisation, par ces êtres inférieurs, de l'acide nitrique formé dans l'air par les actions électriques qui, aujourd'hui encore, donnent incessamment naissance à sa production dans les régions inférieures de l'atmosphère.

Que ces deux modes de nutrition aient concouru simultanément à former, à l'origine, les organismes inférieurs, ce qui paraît probable, ou que l'un des deux seulement ait été mis en œuvre, il est certain que la source unique de la *première* matière azotée organisée qui a pris naissance sur la terre est l'azote moléculaire de l'air.

Une fois formées, les substances azotées ont servi à nourrir une classe de végétaux aptes à s'alimenter de matière organisée (saprophytes, etc.), mais, pour devenir utilisables par les plantes d'un rang plus élevé dans l'échelle botanique, ces substances doivent subir,

sous l'influence d'actions ignorées il y a trente ans encore, le phénomène connu de tous sous le nom de nitrification. L'azote des matières azotées se transforme successivement dans le sol, en ammoniaque, en acide nitreux et finalement en acide nitrique.

Jusqu'en 1877, on ignorait la véritable cause de la formation des nitrates dans le sol. L'intervention d'un être vivant dans la nitrification, prévue par Pasteur, en 1862, a été découverte par MM. Th. Schlœsing et Ach. Müntz. Ces savants démontrèrent expérimentalement que la nitrification est le résultat de l'action, dans le sol, de microbes spécifiques auxquels est dévolu un rôle capital, l'oxydation des matériaux azotés qu'ils transforment en acide nitrique. La nitrification est donc un phénomène biologique; les microbes nitrificateurs possèdent, à certains égards, les caractères des êtres supérieurs; comme eux, ils sont sensibles à l'action des anesthésiques, ils s'endorment sous l'influence du chloroforme, se réveillent ou meurent, suivant qu'on suspend ou qu'on prolonge l'action anesthésiante; comme eux, ils succombent sous l'influence d'une température élevée. Ces micro-organismes se comportent donc comme des êtres vivants. Les belles recherches de Winogradsky lui ont fait découvrir un microbe nitrifiant capable de se développer, en l'absence de matière organique, en empruntant le carbone et l'azote nécessaires à son développement aux substances minérales, ce qui expliquerait comment, à l'origine, ces petits êtres ont pu fixer l'azote atmosphérique.

En nous révélant le rôle gigantesque des infiniment petits dans la nature, le génie de Pasteur nous a montré comment, suivant son expression, « la mort est la condition essentielle de la vie à la surface du globe ». Répandus en nombre prodigieux dans l'atmosphère et dans le sol (un gramme de terre arable en renferme des millions) les microbes sont les agents indispensables de la destruction des êtres organisés. S'ils n'étaient pas là, pour ramener la substance organique à l'état minéral : acide carbonique, eau, azote ammoniacal ou nitrique, l'encombrement de la surface de la terre y rendrait impossible de nouvelles générations d'êtres vivants; ce sont donc les microbes qui assurent la continuité de la vie sur notre planète, en restituant à la terre et à l'atmosphère les matières minérales que les plantes et les animaux leur ont empruntées.

Le cycle de la vie s'accomplit grâce à eux ; par eux, se réalise la parole de l'Écriture : « *Pulvis es et in pulverem reverteris.* »

Tous les êtres qui vivent à la surface du globe ont tiré leur substance des êtres qui les ont précédés.

Revenant à la nitrification, voyons à grands traits comment les choses se passent.

Les microbes attaquent la matière organique et la décomposent pour s'en nourrir : dans le sol, les transformations qu'elle subit ont pour résultat, au point de vue qui nous intéresse particulièrement, de donner successivement naissance à de l'ammoniaque, à de l'acide nitreux et finalement à de l'acide nitrique.

Que devient cet acide nitrique dans le sol ? Il ne saurait y demeurer à l'état de liberté ; il s'unit, au moment même de sa formation, aux éléments basiques du sol, c'est-à-dire à la chaux, à la magnésie, à la potasse existant à l'état de carbonates ou d'autres sels facilement décomposables. Cette union donne naissance à des nitrates neutres auxquels la plante empruntera, au fur et à mesure de ses besoins, l'azote nécessaire à son développement. La chaux étant, dans la presque totalité des cas, l'élément basique de beaucoup le plus répandu et le plus abondant, on est amené à considérer le nitrate de chaux comme fournissant à nos récoltes la presque totalité de l'azote qui pourvoira à notre existence, sous forme de gluten dans les céréales, de chair dans les animaux.

Les mémorables recherches de J.-B. Boussingault ont établi, par des expériences directes, l'assimilation des nitrates par les plantes et leur transformation dans le végétal en albumine et autres principes azotés. Deux faits sont donc acquis d'une manière incontestable : la transformation, dans le sol, des substances azotées d'origine végétale ou animale en acide nitrique et la valeur alimentaire de ce dernier pour les plantes.

Au commencement du dix-neuvième siècle, un agronome allemand bien connu, Einhoff, avait déjà signalé la haute valeur du nitrate de chaux comme aliment azoté des plantes, par l'analyse d'une terre très fertile dans laquelle il reconnut la présence de ce sel.

H. Knopp, Hellriegel et, à leur suite, de nombreux expérimentateurs ont montré que le nitrate de chaux est une des formes les plus

favorables à l'assimilation de l'azote nécessaire au développement des végétaux [1].

Tant que la culture est demeurée extensive, les quantités de matériaux azotés qu'apportait au sol le fumier dont le cultivateur disposait ont pu suffire à la production de récoltes, d'ailleurs médiocres; mais lorsqu'il s'est agi d'obtenir des rendements plus élevés en pratiquant la culture intensive, on a vite reconnu l'insuffisance du fumier et la nécessité de fumures azotées d'une autre origine. Deux sources principales d'engrais azotés ont été jusqu'ici offertes à l'agriculture : le nitrate de soude et le sulfate d'ammoniaque.

Découvert vers 1820, le nitrate du Chili a fait sa première apparition en Europe en 1830. Presque nulle, en agriculture, jusqu'en 1860, la consommation du nitrate a été en croissant rapidement jusqu'aujourd'hui où l'exportation chilienne atteint 1 500 000 tonnes par année. Un cinquième de cette quantité est utilisé par l'industrie, les quatre autres cinquièmes vont à l'agriculture.

Certains statisticiens estiment que les gisements du Chili seront épuisés dans moins d'un demi-siècle.

Sir William Crookes et F. V. Vergara, de leur côté, évaluent à vingt années, au maximum, l'épuisement des gisements de nitrate actuellement connus. Ils calculent que, vers 1925, on en verrait la fin. Cette estimation peut sembler pessimiste, mais il n'est pas douteux

---

1. Ainsi que je l'ai dit tout à l'heure, sous l'influence des phénomènes électriques dont l'enveloppe gazeuse de la terre est le siège, la combinaison des deux gaz qui la constituent donne naissance à de l'acide nitrique; les faibles quantités de ce corps ainsi formé se combinent, à leur tour, aux traces d'ammoniaque que l'air renferme, et le nitrate d'ammoniaque résultant de cette union est apporté au sol par l'eau pluviale et par la neige. Mais les quantités d'azote, très variables d'ailleurs, que reçoit ainsi la terre ne forment qu'un appoint bien faible aux sources d'alimentation azotée de la plante (quelques kilogrammes par hectare et par an). Ce sont, en réalité, les nitrates produits dans la couche superficielle du sol, par la transformation graduelle, sous l'influence des microbes, des détritus des plantes et des animaux, qui offrent presque exclusivement aux végétaux l'azote dont ils ont besoin. Une partie seulement de l'azote de ces détritus passe à l'état d'acide nitrique et les phénomènes dont le sol est le siège (dénitrification, etc.) sont accompagnés d'un retour à l'atmosphère, à l'état libre, d'une partie de l'azote combiné. Ce retour à l'atmosphère d'une partie de l'azote qui lui a été emprunté compense, sans doute, la formation dans l'air des produits nitrés que nous apportent les chutes météoriques, ce qui expliquerait la constance de la composition élémentaire de l'air.

qu'à moins de découvertes imprévues, il faut s'attendre, dans un temps plus ou moins proche, à l'épuisement des gisements exploités aujourd'hui.

L'origine de l'acide nitrique du nitrate de soude est la même que celle des nitrates de nos terres. Elle réside, suivant toute apparence, dans la nitrification d'abondants dépôts de matières organiques sous l'influence microbienne, et production, — par double décomposition du nitrate de chaux formé et de l'eau de mer, — du nitrate de soude qui s'est accumulé dans certaines régions en l'absence séculaire de toute chute d'eau pluviale.

La source principale d'ammoniaque nous est fournie par la combustion de la houille. Les végétaux accumulés à la période houillère ont conservé une grande partie de l'azote qu'ils avaient assimilé (la houille en contient environ 1 °/₀ de son poids). Distillée pour fournir le gaz d'éclairage et le coke métallurgique, la houille dégage son azote sous forme d'ammoniaque, que l'industrie transforme en sulfate et livre à l'agriculture.

Bien qu'il soit certain que l'épuisement des houillères exigera beaucoup plus de temps que celui des gisements de nitre, il n'est pas téméraire de prévoir qu'il se produira à un moment donné.

La découverte de la transformation économique de l'air atmosphérique en acide nitrique, de même qu'en ammoniaque (chaux-azote), sont donc des faits d'une importance capitale qui méritent au plus haut degré d'attirer l'attention des cultivateurs.

Avant d'aborder l'exposé de la découverte de MM. Birkeland et Eyde, sujet principal de cette causerie, il me faut examiner avec vous si, dans un prochain avenir, l'agriculture, pour suffire à l'alimentation de la population croissante du globe, est assurée de trouver, dans le nitrate de soude et dans le sulfate d'ammoniaque, les sources d'azote nécessaire à l'accroissement des rendements du sol.

Question capitale à laquelle on est conduit à répondre négativement, ainsi que je crois pouvoir aisément vous le démontrer.

Un économiste américain, Davis Wood, et un éminent savant anglais, Sir William Crookes, ont étudié cette question, en s'appuyant sur les données les plus exactes qu'il leur a été possible de réunir.

Davis Wood a publié sur ce sujet, il y a une douzaine d'années,

une étude des plus intéressantes, dans laquelle il compare l'accroissement de la population mondiale à celui des ressources alimentaires de l'homme.

Nous lui emprunterons quelques chiffres démonstratifs.

La population globale du monde dépasse 1 milliard 525 millions d'individus. Cette population, D. Wood la divise en deux groupes : la population qui mange du pain (les *bread eaters,* comme il les nomme), formée par les habitants de l'Europe entière et ceux des États-Unis d'Amérique, du Canada, de l'Australie, du Sud-Amérique tempéré et du Sud-Afrique (Cap).

Voilà les sept régions, la Chine, qui vit de riz, étant laissée de côté, où la race blanche consomme du pain. Quelle était, en 1870, la population des mangeurs de pain? D. Wood l'a évaluée à 359 millions de têtes, et, pour 1895, elle serait de 510 millions. D'où augmentation, en vingt-cinq ans, de 149 millions de mangeurs de pain [1].

D. Wood a cherché à établir quelle a été, pendant cette période, l'augmentation, en surface, des cultures de plantes alimentaires. Il a trouvé ainsi que, tandis que le nombre des mangeurs de pain avait augmenté de 37 °/₀ en vingt-cinq ans, la surface totale en cultures de blé, seigle, sarrasin, maïs, pommes de terre, riz, ne s'était accrue, dans les pays envisagés, que de 20,4 °/₀.

Nous voilà donc en présence de chiffres qui montrent qu'incontestablement viendra le moment où certaines populations humaines de mangeurs de pain auront augmenté au point qu'on irait à la famine.

D. Wood estime, d'après ses calculs, que d'ici à un temps très court il faudrait que les cultures vivrières pussent s'étendre sur 55 millions d'hectares nouveaux, superficie un peu plus grande que celle de la France.

Où la trouver, cette surface? Où pourra-t-on la conquérir? En Europe? C'est impossible : toutes les terres aptes à ces cultures sont déjà occupées. Sir W. Crookes, de son côté, exprimait, en 1898, la conviction que, d'ici à quarante ans, les derniers hectares propres

---

1. Sir William Crookes évalue à 746 millions, en 1931, le nombre des mangeurs de pain.

à la culture des céréales seront, en Europe, consacrés aux plantes alimentaires.

Les pays hors d'Europe pourraient-ils suffire à l'augmentation de surface nécessaire ? La réponse est également négative, la culture des céréales étant nécessairement limitée aux régions tempérées.

Où chercher alors la solution de cette question si grave pour le bien-être de l'humanité ? Elle est tout entière dans la nécessité impérieuse d'accroître les rendements des sols aujourd'hui cultivés.

De très grands progrès ont été déjà réalisés sous ce rapport. Mais combien il reste encore à faire ! Grâce aux fumures minérales, on obtient aujourd'hui des rendements beaucoup plus élevés qu'autrefois et c'est dans cette voie que l'agriculture doit, de plus en plus, chercher l'augmentation de ses récoltes.

Or, la quantité de fumier de ferme dont on dispose est absolument insuffisante pour arriver à un accroissement sensible de production et, d'autre part, la quantité des fumures organiques ne peut augmenter que si l'élévation de la production, plus abondante, de fourrages permet d'accroître le nombre des animaux de ferme. On se trouve donc en présence d'un cercle vicieux.

En conséquence, c'est à des sources d'azote, autres que le fumier d'étable, que nous devons avoir recours.

Trois éléments sont indispensables à l'alimentation des plantes, comme on le sait : l'acide phosphorique, la potasse et l'azote.

L'approvisionnement en acide phosphorique et en potasse est assuré : nous ne devons avoir aucune préoccupation à cet égard ; en effet, les colossaux gisements de phosphates de l'Algérie, de la Tunisie, de la Floride, et les immenses dépôts de sels potassiques de Stassfurt nous affranchissent, pour des siècles au moins, de toute inquiétude au sujet de la restitution à nos terres de l'acide phosphorique et de la potasse enlevés par nos récoltes.

En est-il de même de l'azote ? Assurément non.

Quelques indications sommaires sur les exigences des cultures de la France, en azote, préciseront la situation, en ce qui regarde notre pays.

Nos récoltes annuelles renferment 600 000 tonnes d'azote, en nombre rond. Or, notre bétail est insuffisant pour restituer au sol

cette masse d'azote enlevée annuellement. En prenant, comme base, les chiffres publiés par M. E. Tisserand dans sa remarquable étude sur l'économie rurale de la France [1], on constate que l'azote restitué par le fumier de ferme, en supposant qu'il soit entièrement apporté sur nos champs, ce qui n'est certainement pas, ne représenterait que 327 000 tonnes ; il nous faudrait donc, pour combler le déficit, donner à nos terres, sous forme d'engrais minéraux, 273 000 tonnes d'azote. Il est aisé de voir combien nous sommes loin de cette restitution.

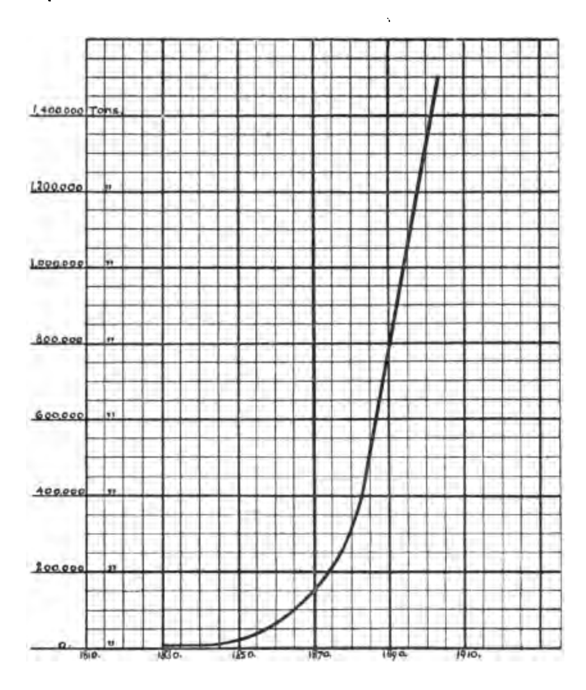


Fig. 1. — Graphique de l'exportation du nitrate du Chili.

En 1830, on ne connaissait pas le nitrate du Chili ; le graphique ci-dessus nous montre qu'on a commencé à en importer en Europe de faibles quantités vers 1850. En progression considérable depuis cette époque, l'exportation du nitrate du Chili atteignait, en 1905, le chiffre de 1 500 000 tonnes : or, les 600 000 tonnes d'azote d'une récolte correspondent à 1 700 000 tonnes de nitrate de soude : cela

1. Statistique décennale de 1882.

montre que l'exportation du nitrate du Chili ne représente pas même la quantité d'azote nécessaire pour combler le déficit annuel en azote du sol français. La France ne consomme que 230 000 tonnes de nitrate, représentant 31 200 tonnes d'azote, alors que le déficit est de 273 000 tonnes; notre importation n'est donc que de 11 °/₀ du déficit produit par le prélèvement des récoltes. Bien que l'exportation chilienne augmente de 4 °/₀ par an, elle est donc loin de correspondre aux exigences des cultures européennes.

Je disais tout à l'heure que les évaluations les plus optimistes fixent à quarante ou cinquante ans l'épuisement des gisements chiliens. Quoi qu'il en soit de la justesse de ces prévisions, il est certain que, dans un temps relativement court, nous manquerons de nitrate de soude, à moins, ce qui est peu probable, qu'on ne découvre de nouveaux gisements abondants de ce précieux engrais.

Le nitrate de soude est un engrais de premier ordre : malgré la faible consommation que nous en faisons, son emploi a pris une part très notable à l'élévation des rendements en céréales, en betteraves, etc., constatée depuis vingt-cinq ans.

Les cultivateurs qui l'emploient en obtiennent des résultats excellents, dont vous jugerez par quelques chiffres :

100 kilogr. de nitrate donnent, en moyenne, les excédents moyens de rendements suivants :

Céréales : 300 à 400 kilogr. de grain et la paille correspondante ;

Pommes de terre : 35 quintaux métriques ;

Betteraves : 55 quintaux métriques ;

Racines fourragères, maïs vert : 45 à 55 quintaux métriques.

En vous rappelant ces plus-values, dues au nitrate, je désire combattre l'erreur commise par certains cultivateurs qui, en présence de l'élévation des prix du nitrate, estiment qu'il faut cesser de l'employer. Grave erreur : par exemple, après un hiver et un printemps humides comme ceux que nous venons de traverser, l'emploi du nitrate s'impose. Les terres délavées par les pluies ont perdu une grande partie des nitrates qu'elles renfermaient ; ces sels, très solubles dans l'eau, ont été entraînés dans le sous-sol. Il importe donc de compenser ces déperditions par l'apport d'une quantité convenable de nitrate sur les sols en culture.

L'augmentation de prix ne doit pas arrêter, dans l'emploi du nitrate, les cultivateurs soucieux de leurs véritables intérêts.

Le quintal de nitrate coûtait autrefois 18 fr. ; aujourd'hui, il coûte 25 à 27 fr. ; c'est un prix très élevé assurément ; mais, même à ce prix, les cultivateurs ont encore un intérêt certain à l'employer, à raison de son efficacité pour l'augmentation des rendements ; je m'efforce, chaque fois que l'occasion s'en présente, de le leur démontrer.

MESDAMES et MESSIEURS,

De ce que je viens d'avoir l'honneur de vous exposer, se dégagent quelques faits sur lesquels j'ai cru nécessaire d'appeler votre attention, pour vous faire pressentir l'importance de la découverte de MM. Birkeland et Eyde.

J'espère avoir suffisamment mis en lumière les quatre points suivants :

1° La source unique, directe ou indirecte, de l'azote des végétaux réside dans l'atmosphère ;

2° La consommation de la végétation en azote est colossale ;

3° L'azote nitrique est l'aliment azoté, par excellence, de nos cultures ;

4° Les sources actuelles d'acide nitrique et d'ammoniaque sont absolument insuffisantes pour permettre, dans l'avenir, un accroissement des rendements de nos terres, proportionnels à l'augmentation régulière de la population blanche du globe.

Vous comprendrez, dès lors, l'intérêt qu'a suscité dans le monde savant la recherche de procédés économiques de transformation de l'azote, dont l'air nous offre un réservoir gratuit, inépuisable, en l'une des deux formes aptes à nourrir les plantes : acide nitrique ou ammoniaque.

Sir William Crookes, qui présidait, en 1898, l'Association britannique, après avoir constaté l'insuffisance des approvisionnements en azote des gisements du Chili et envisagé leur épuisement à brève échéance, proclamait que la plus grande découverte qu'on doive attendre de la science est la fixation de l'azote de l'air sous une forme utilisable par l'agriculture. « Le laboratoire, disait-il, affranchira le

monde de la famine (*Starvation may be averted through laboratory*). » Il ajoutait : « C'est la science chimique et l'utilisation des forces hydrauliques, restées jusqu'ici presque sans emploi, qui préserveront nos descendants de cet effroyable fléau. »

Cette prophétie de l'illustre savant anglais est aujourd'hui accomplie. Il me reste à dire comment, et j'entre dans le vif de mon sujet.

De 1903 à 1905, deux découvertes ont été faites, pour le plus grand bien de l'agriculture.

Le professeur Frank, de Berlin, en collaboration avec M. Caro, a réalisé la fabrication industrielle d'un composé que les chimistes appellent cyanamide de calcium et qu'on désigne, dans le commerce, sous le nom de chaux-azote (*Kalk-Stickstoff*). C'est une matière brune qui contient 20 à 21 °/₀ d'azote. J'y reviendrai dans un instant. Au même moment, MM. Birkeland et Eyde ont réussi à fabriquer directement l'acide nitrique avec l'air seul, sous l'influence de l'électricité.

Une seule condition est commune à ces procédés de fixation de l'azote : l'emploi de l'électricité produite à l'aide de forces hydrauliques. Le prix élevé du charbon exclut, en effet, complètement son emploi pour la production d'énergie électrique à un prix de revient assez bas pour permettre la production économique des nitrates ou des sels ammoniacaux.

Les deux procédés ne sont donc applicables que dans le voisinage de chutes d'eau considérables.

Je ne pourrais, sans sortir du cadre de cette causerie, m'étendre sur la fabrication de la chaux-azote ; je la rappellerai en quelques mots.

MM. Frank et Caro préparent la chaux-azote de la manière suivante :

Fusion, dans un four électrique, d'un mélange de chaux et de charbon. Insufflation, dans ce mélange, d'azote extrait de l'air par le procédé classique des laboratoires, consistant à faire passer de l'air dans un récipient contenant du cuivre métallique incandescent qui enlève l'oxygène. On refoule l'azote dans le four à carbure et on obtient un mélange de cyanamide de calcium et de charbon, titrant 20 à 21 °/₀ d'azote. Cet engrais a donc la richesse du sulfate d'ammoniaque. Pour être assimilé par les plantes, il faut qu'il se transforme

dans le sol, au contact de l'humidité, en ammoniaque et en carbonate de chaux.

J'ai expérimenté deux années de suite, au Parc des Princes, ce nouvel engrais, sur céréales et sur pommes de terre. Les résultats de ces essais ont été satisfaisants : le cyanamide, à dose égale d'azote, comparé au sulfate d'ammoniaque et au nitrate de soude, s'est montré à peu près égal au sulfate et inférieur seulement de quelques pour-cent au nitrate de soude.

Avant de décrire le procédé électrique imaginé par MM. Birkeland et Eyde, il convient de rappeler sommairement l'œuvre de leurs prédécesseurs et l'état de la question, au moment où les savants norvégiens en ont abordé l'étude.

En 1771, en même temps que Lavoisier, Priestley isole l'oxygène. En 1776, Lavoisier découvre le protoxyde d'azote.

Il y a cent vingt-cinq ans, en 1781, H. Cavendish, l'illustre chimiste anglais auquel on doit les premières connaissances positives sur les gaz, découvre l'hydrogène et la combustibilité de ce gaz. Ayant remarqué que l'hydrogène s'enflamme dans l'air, et que sa combustion donne naissance à de l'eau, il constate bientôt que le produit de cette combustion contient de l'acide nitrique.

La conséquence de cette première découverte est que l'azote est oxydable sous l'influence de la température produite par la combustion de l'hydrogène dans l'air.

En 1783, poursuivant ses expériences, H. Cavendish construit le premier eudiomètre basé sur la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène, sous l'influence de l'étincelle électrique. Il montre que, dans cette opération, il se produit de l'oxyde d'azote, en même temps que de l'eau, et que cet oxyde se transforme en acide nitrique au contact de l'eau.

H. Cavendish a donc établi expérimentalement la formation de l'oxyde d'azote et celle de l'acide nitrique, sous l'influence de l'étincelle électrique.

Plus d'un siècle s'écoule sans qu'on ajoute rien aux faits fondamentaux découverts par le physicien anglais, à savoir, l'oxydation de l'azote atmosphérique par une action électrique et sa transformation en acide nitrique au contact de l'eau.

En 1804, Davy, le premier, montre que l'arc électrique est une flamme. En 1880, Sir James Dewar découvre la formation, dans l'arc électrique, de nitrite et de cyanogène : il cherche à déterminer, à l'aide de lampes Siemens et de bougies Jablochkoff, actionnées par un courant alternatif de Méritens, la quantité d'acide nitreux produite. Avec la machine de Siemens, le maximum obtenu fut 804 milligrammes par heure; avec un courant de Méritens de haute intensité, le rendement le plus élevé en acide nitreux fut de 1 257 milligrammes par heure. L'énergie électrique employée n'est pas connue, mais M. S. Thompson[1] estime qu'elle devait être égale à 1 kilowatt environ.

Dewar conclut de ses expériences que de l'acide nitrique se forme dans l'arc, mais qu'il est réduit en anhydride nitreux au contact du charbon rouge des électrodes ou par une autre cause.

Plus tard, en 1892, Sir William Crookes, par une expérience faite devant la Société royale de Londres, montre que l'azote donne naissance, au contact de l'air, sous l'influence d'un fort courant d'induction, à une flamme qui renferme des acides nitreux et nitrique.

En 1895, MM. Perot et Coupier entreprirent, à la faculté des sciences de Marseille, des recherches sur l'oxydation de l'azote atmosphérique par l'action de la décharge électrique agissant sur l'air naturel. Le courant alternatif à haute tension (plusieurs milliers de volts) traversait l'air contenu dans une ampoule. Cet air sans cesse renouvelé barbotait dans des absorbants convenables. Le maximum de rendement obtenu par ces savants, pour une certaine distance des électrodes et une certaine intensité de courant, correspondait à 360 kilogr. d'acide monohydraté par kilowatt-an, l'année étant comptée de trois cent soixante-cinq jours et celui-ci de vingt-quatre heures.

En 1897, lord Rayleigh, au cours des recherches qui ont abouti à la découverte de l'argon, imagine un appareil pour réaliser l'expérience de Crookes sur une plus large échelle.

Dans un vase d'une capacité de 50 litres, lord Rayleigh détermine la production d'acide nitrique en y faisant brûler un arc (2 000 volts

---

1. Conférence faite à Londres sur le four Birkeland et Eyde. *The Electrician,* février 1906.

de tension) ; un jet d'une dissolution de potasse caustique coule dans le vase, tandis qu'on y insuffle un mélange de onze parties d'oxygène et neuf parties d'air, quantités théoriquement nécessaires pour la formation de peroxyde d'azote. En une heure, lord Rayleigh transforme 21 litres du mélange en acide nitrique, obtenant ainsi, pour une dépense d'un kilowatt-heure, environ 50 grammes d'acide nitrique, ce qui correspondrait à 438 kilogr. par kilowatt-an.

En 1898, Sir William Crookes, exposant l'état de la question, voit dans les expériences de lord Rayleigh la possibilité de résoudre industriellement le problème posé par la nécessité d'augmenter les ressources alimentaires de l'homme. Les chutes du Niagara lui paraissent devoir se prêter économiquement à cette solution. Partant des résultats de lord Rayleigh, Sir William Crookes calcule que si l'énergie électrique peut être obtenue moyennant une dépense d'un soixante-dixième de penny par kilowatt-heure, le nitrate de soude pourra être fabriqué à raison de 5 livres sterling par tonne, soit 125 fr., le prix courant du nitrate du Chili étant, à cette époque, de 7 livres 10 schellings (187 fr. 50) par tonne.

En 1903, Muthmann et Hofer poursuivirent l'étude de la question, mais les résultats qu'ils obtinrent (34 grammes d'acide nitrique par kilowatt-heure) n'étaient pas encourageants au point de vue d'une entreprise industrielle.

Deux autres physiciens, Mac Dougall et Howles, font de leur côté des expériences dans la même direction. Ils arrivent à produire une certaine quantité d'acide nitrique. Leurs recherches les amènent à constater la dissociation rapide, à haute température, du peroxyde d'azote en azote et en protoxyde d'azote. D'après eux, la production de l'oxyde d'azote doit être obtenue dans certaines conditions ne permettant pas cette dissociation. Ils signalent, à ce propos, la nécessité d'éloigner rapidement l'arc électrique de la zone incandescente, afin de prévenir la décomposition du peroxyde d'azote.

En 1902, se fonda l'*Atmospheric Product Company,* qui tenta en Amérique, aux chutes du Niagara, la production industrielle de l'acide nitrique.

Une usine d'essai fut installée pour appliquer les procédés de Bradley et Lovejoy qui donnèrent d'assez bons résultats comme pro-

duction d'acide par kilowatt, mais qui nécessitaient des appareils trop compliqués pour en assurer le succès industriel. Depuis l'été de 1904, l'usine du Niagara a cessé de fonctionner.

Les appareils de Bradley et Lovejoy sont cependant très intéressants. Ils consistent essentiellement en un tambour ou cylindre métallique d'une hauteur de 1^{m},64 et d'un diamètre de 1^{m},23, dont la figure 2 représente une coupe suivant le diamètre du cylindre. La paroi *intérieure* de ce tambour est garnie d'un grand nombre d'électrodes disposées suivant le rayon et formées de courtes pointes de platine.

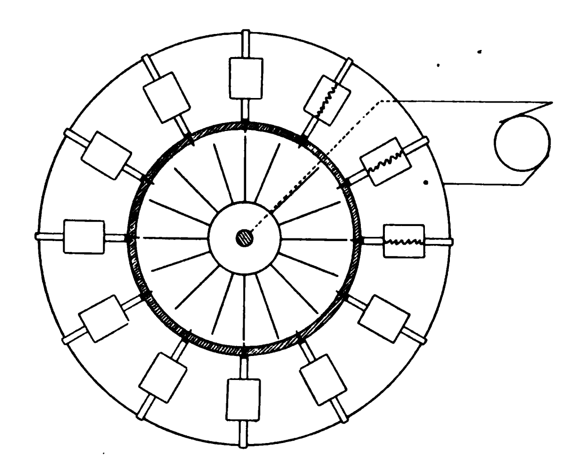


Fig. 2. — Coupe du système de tambour tournant, de Bradley et Lovejoy.

Dans l'intérieur de ce tambour se trouve un cylindre de moindre diamètre dont la paroi *extérieure* est garnie d'électrodes de platine.

Dans la rotation dont on anime l'un des tambours, les pointes des deux cylindres arrivent au contact les unes des autres. Les deux tambours communiquent avec les pôles d'un courant continu à une tension de 8000 à 10000 volts. Lorsque les pointes se trouvent assez rapprochées les unes des autres, il se produit des arcs électriques dont le mouvement tournant amène rapidement l'allongement jusqu'à leur extinction.

Dans l'espace resté libre entre les deux tambours, on insuffle de l'air qui se transforme partiellement, au contact des arcs lumineux, en oxyde d'azote. Le principe de cette invention repose sur la pro-

duction d'arcs lumineux ayant une aussi grande longueur et une section aussi petite que possible, de manière à ce que leurs surfaces soient léchées par le plus grand volume d'air possible.

Or, on sait qu'un arc électrique ordinaire, de grande énergie, est dense et volumineux et qu'on ne peut pas le faire traverser par une quantité d'air proportionnelle à son intensité énergique. C'est la cause pour laquelle l'arc électrique ordinaire ne peut pas être favorablement appliqué à l'oxydation de l'azote atmosphérique.

C'est pour cette raison que Bradley et Lovejoy ont eu recours à une voie détournée, leur permettant de diviser un arc de haute énergie en une infinité de petits arcs : ils sont ainsi arrivés à produire jusqu'à 414 000 étincelles dans un appareil de 5 kilowatts. Ils ont réussi à oxyder l'azote de l'air d'une manière satisfaisante, mais on se rend compte aisément des difficultés techniques auxquelles Bradley et Lovejoy se sont heurtés dans l'application (1).

L'expérience du Niagara a montré que des appareils de cette nature ne peuvent être utilisés industriellement ; non pas que leur fonctionnement soit mauvais, mais parce que le prix de revient de l'acide nitrique produit est trop élevé pour qu'on puisse obtenir du nitrate dans des conditions favorables de lutte avec le nitrate du Chili.

L'*Atmospheric Product Company* croyait, en utilisant 150 000 chevaux pris sur les chutes du Niagara, pouvoir alimenter le monde entier en nitrate de soude, mais, comme je l'ai dit, l'usine a cessé de fonctionner.

Presque au même moment, deux savants suisses, MM. Kowalski et Mozciki, firent à leur tour, à Fribourg, des essais de fabrication de l'acide nitrique par voie électrique. Ils eurent recours à des courants alternatifs à très haute tension (50 000 et jusque 75 000 volts). Ils obtenaient ainsi des fréquences de courants, qu'on nomme périodes, allant jusqu'à 10 000 par seconde. Les électrodes employées étaient en aluminium. Une société d'essai fut constituée à Fribourg, en Suisse, pour essayer d'exploiter le procédé. Mais là, une fois encore, jusqu'à présent au moins, le succès n'a pas répondu aux efforts tentés dans cette direction.

---

1. Conférence de Eyde à Christiania, décembre 1905.

Nous voici en 1903. Nous arrivons à la découverte de Birkeland et Eyde dont le procédé diffère essentiellement de ceux dont je viens de parler.

Dans une expérience pour laquelle le professeur Birkeland employait un courant continu, produit par 40 ampères et 600 volts de tension, un contact qui s'établit accidentellement avec des pièces métalliques voisines de l'appareil produisit un champ magnétique très intense présentant 25 000 lignes de force. Au point de contact, se développa, avec un son intense, une flamme plate en forme d'un demi-disque d'environ 10 centimètres de diamètre (fig. 3).

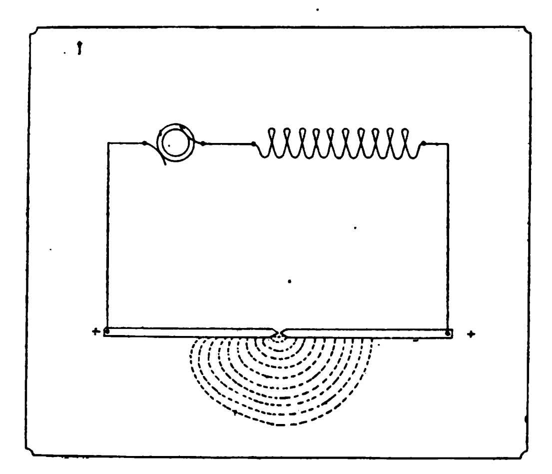


Fig. 3. — Demi-disque lumineux produit par un courant continu.

Pour étudier ensuite de plus près le phénomène, Birkeland se servit d'un courant continu de 2 ampères, pris sur un courant continu d'une dynamo de 3 000 volts de tension. Les électrodes furent placées équatorialement entre les deux pôles d'un puissant électro-aimant et demeurèrent invariablement distantes de 2 millimètres l'une de l'autre.

Il se produisit alors une belle flamme, stable, en même temps qu'un son clair ressemblant par moments presque complètement au bruit d'un sifflet. En faisant varier dans de grandes limites la force de l'électro-aimant, on élevait la hauteur du son avec l'intensité de l'aimant.

Cette expérience fut ensuite répétée à Genève, en présence de nombreux physiciens, en se servant d'une puissante dynamo du système Thury. Le courant était de 20 ampères et l'on employait l'électro-aimant construit pour l'université de Genève. Le sifflement de l'arc était presque intolérable ; le son clair et persistant s'étendait sur quatre octaves environ, suivant les variations de l'énergie du courant.

Si l'on emploie un courant alternatif à haute tension, on obtient une flamme mince analogue à celle que produit le courant continu, mais le disque qu'elle forme est complet [1] (fig. 4.) et le son produit est

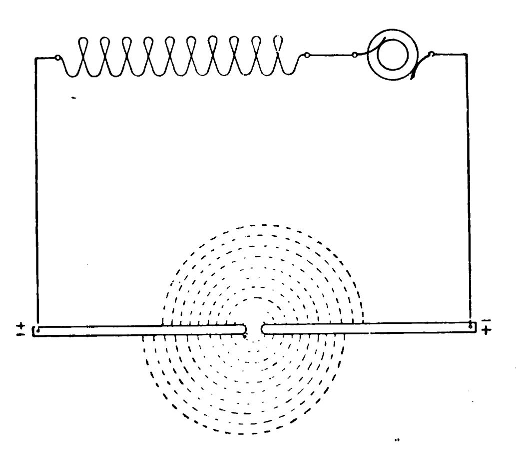


Fig. 4. — Disque lumineux produit par un courant alternatif.

confus et différent de celui du courant continu, parce qu'ici le nombre des périodes du courant alternatif, joint à l'intensité de l'électro-aimant, exerce sur le phénomène une influence notable. Pour mieux concevoir la nature de ce phénomène lumineux, il faut se rappeler que le courant qui traverse un champ magnétique est toujours contraint à se mettre en mouvement (soufflage). Pour s'en convaincre, il suffit de placer entre les pôles de l'électro-aimant un conducteur flexible, maintenu rigide par un poids suspendu perpendiculairement à

1. On savait, depuis 1862, que l'arc lumineux produit par un courant alternatif de haute tension prend la forme d'un disque lorsqu'on lui donne naissance dans un champ magnétique. Il s'agit là d'une forme particulière du soufflage magnétique, observée en 1860 et 1862 par Du Moncel et par Plücker. Ce phénomène n'avait reçu jusqu'ici aucune application.



Fig. 5. — Photographie du disque de flamme produit dans un four Birkeland-Eyde de 250 chevaux.

l'axe de l'électro-aimant. Suivant la direction du courant, ce conducteur se déplacera en avant ou en arrière, s'écartant de 20 centimètres de l'un ou de l'autre côté. Si l'on fait passer par ce conducteur un courant alternatif, on le voit se mouvoir entre les pôles de l'aimant dans un sens ou dans l'autre. Il en est de même avec un arc lumineux : suivant le sens du courant, cet arc se déplace avec une très grande rapidité qui atteint facilement 100 mètres ou plus, à la seconde (fig. 4).

Ce mouvement est particulièrement sensible lorsqu'on l'observe en faisant passer les décharges d'un puissant appareil d'induction dans un espace de 1 à 2 centimètres rempli d'air.

On peut déterminer, à l'aide d'un oscillographe, le nombre des étincelles par seconde, plus exactement que par la hauteur du son.

La figure 5 est la reproduction de la photographie du disque de flamme produit dans un four Birkeland et Eyde de 250 chevaux de force. Ce disque a été obtenu avec un courant alternatif de 50 périodes par seconde et une tension de 5 000 volts.

D'après ce qui précède, la production du disque de flamme s'explique aisément. Dans le voisinage des pointes d'électrodes opposées l'une à l'autre, il se forme un arc lumineux qui se transforme dans un champ magnétique intense en une flamme plate, mobile et flexible. Cette flamme se meut alors perpendiculairement aux lignes de force avec une grande rapidité. Avec les courants continus, je viens de le dire, les arcs lumineux se manifestent tous du même côté (fig. 3) ; on obtient alors un demi-disque. De la hauteur du son on peut déduire le nombre d'arcs produits à la seconde ; avec un puissant électro-aimant on peut en obtenir 1 000 à la seconde.

Lorsqu'on emploie un courant alternatif, les arcs du courant positif se produisent tous d'un même côté, les arcs du courant négatif se manifestant de l'autre côté, étant entendu que l'excitation de l'électro-aimant a lieu par un courant continu. On a alors un disque complet, éclairant (fig. 4 et 5).

Après ces indications préliminaires, j'arrive à la description du four de Birkeland et Eyde, qui est l'élément fondamental de fabrication de l'acide nitrique. C'est un four électrique, d'une nouvelle espèce, dans lequel on développe la flamme de l'arc électrique par une technique spéciale que les savants norvégiens ont les premiers réalisée.

Le point de départ de l'agencement de ce four, comme je viens de le dire, est une observation accidentelle du professeur Birkeland, au cours d'études qu'il poursuivait, depuis deux ans, sur un tout autre sujet.

L'application de la flamme à la combinaison chimique de l'oxygène et de l'azote de l'air ainsi que le dispositif du four sont le résultat de la collaboration des deux savants norvégiens.

Voyons maintenant comment cette flamme est utilisée.

Birkeland et Eyde ont bientôt constaté qu'elle pouvait être, pour la technique industrielle, d'un précieux secours en vue de la réalisation de diverses réactions chimiques et, en première ligne, pour l'oxydation de l'azote atmosphérique.

Le schéma donné par la figure 6 représente le principe de la construction de ce four, en vue de l'oxydation de l'azote de l'air. L'expérience a montré que la flamme produite dans ce système de four est d'une stabilité tout à fait extraordinaire. A l'aide d'une seule paire d'électrodes formées par des tubes en cuivre creux, de 1 centimètre et demi de diamètre (voir fig. 5), refroidies intérieurement par un courant d'eau et distantes l'une de l'autre de 2 millimètres [1], on peut aisément obtenir des flammes d'un diamètre de 1^{m},80, correspondant à l'énergie de 1 000 chevaux.

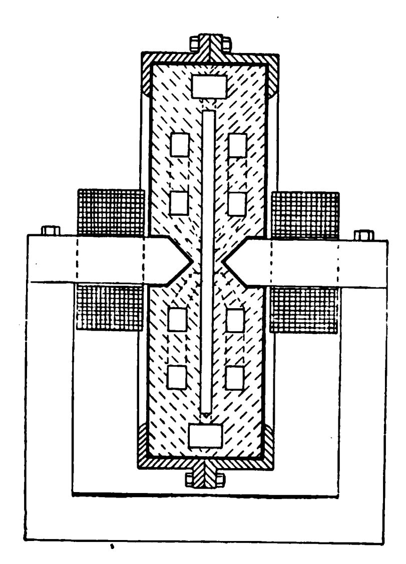


Fig. 6. — Coupe schématique du four.

Ces flammes sont produites dans l'espace central, de 8 centimètres seulement de largeur, d'un four de 2 mètres de hauteur, d'une

1. Malgré ce rapprochement des extrémités des électrodes, il ne se produit pas de courts-circuits, ce qu'explique le soufflage énergique dans le plan magnétique dont j'ai parlé plus haut.

construction durable et ne subissant aucune détérioration. Ces conditions sont d'une importance économique considérable et permettent de réduire d'une façon exceptionnelle les frais de premier établissement de ces appareils.

Avant d'arriver à donner aux fours électriques la dimension et la forme que présentent ceux de l'usine de Notodden, Birkeland et Eyde ont franchi, dans leurs études, plusieurs étapes les rapprochant successivement du résultat excellent auquel ils sont arrivés.

Partis de la fabrication d'un four si petit qu'on pouvait le tenir à la main et nécessitant l'emploi d'une force de quelques chevaux seulement, ils sont arrivés à la construction du type actuel actionné par une force de 1 000 chevaux.

Les appareils d'absorption des gaz nitrés produits, dont je parlerai dans un instant, étaient, au début, de simples ballons de verre de quelques litres, remplacés aujourd'hui à Notodden par des tours en granit de 40 à 50 mètres de capacité.

Le premier four a été construit pour une énergie de 3 à 4 kilowatts, correspondant à celle de 5 chevaux environ. Il était alimenté par un courant alternatif à 50 périodes et 5 000 volts de tension. C'est à la fabrique de Frognerkillens, à Christiania, qu'il a été construit et expérimenté, en juillet 1903. Ce four primitif de 3 à 4 kilowatts, que nous avons vu, M. Schlœsing et moi, à Vasmoen, consistait en une caisse de cuivre garnie intérieurement d'amiante et de mica. Les électrodes étaient des tubes de cuivre aplatis pénétrant dans la caisse de cuivre par des buses garnies de substances isolantes. L'air arrivait par les électrodes, lancé dans la flamme à raison de 150 litres environ par minute.

Le premier progrès fut la construction d'un four de 10 kilowatts (septembre 1903) ; des expériences furent faites avec l'air ordinaire, l'air enrichi en oxygène, de l'air chauffé, refroidi, desséché, etc. Comme, à la fabrique de Frognerkillens, on ne pouvait disposer d'une quantité d'énergie électrique supérieure à 20 kilowatts, Birkeland et Eyde transportèrent au mois d'octobre leur laboratoire d'études à Ankerlökken (situé à Christiania également), dans un bâtiment spécial de la station secondaire des forces électriques de la ville (fig. 8). Ils purent alors utiliser un courant alternatif de



Fig. 7 — Vue d'un four de Notodden en construction.



Fig. 8. — Vue de la station d'Ankerlökken (1903).

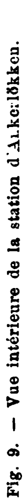


Fig. 9. — Vue intérieure de la station d'Ankerlökken.

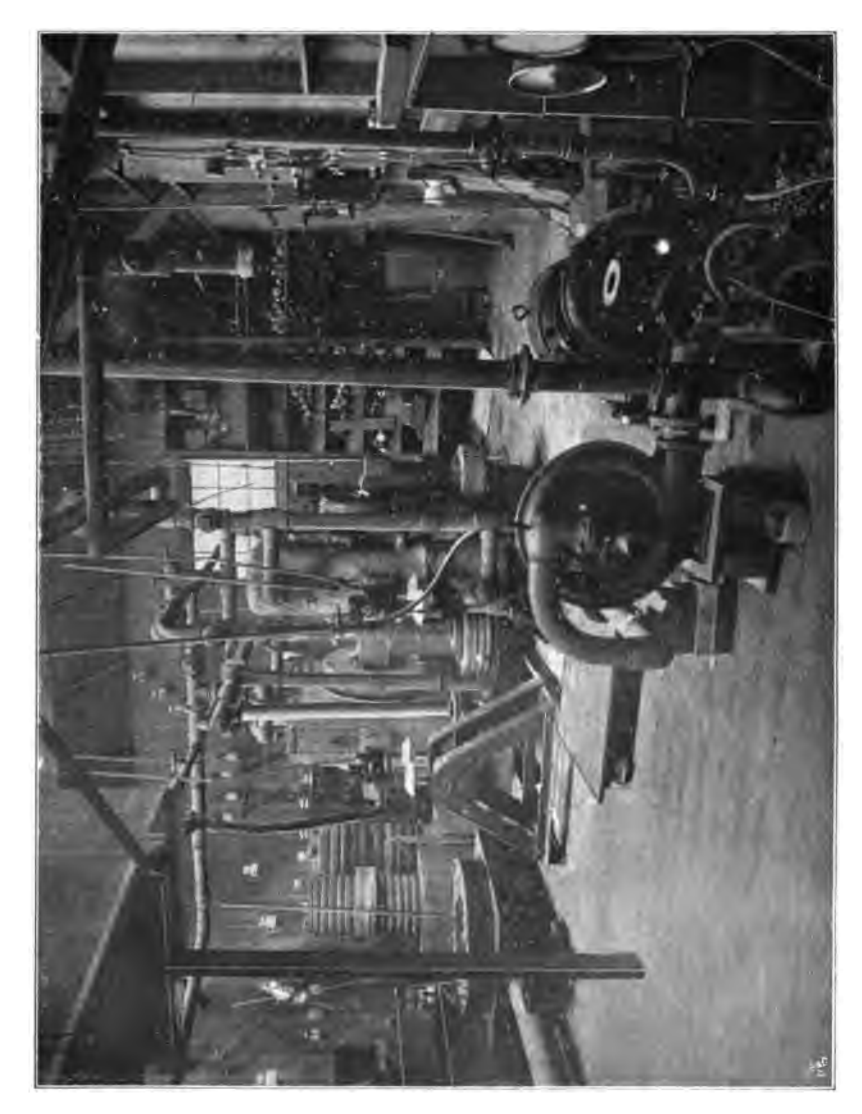


Fig. 10. — Intérieur de la station d'Anker-Birken.



Fig. 11. — Deux fours construits pour les premiers essais.

40 à 50 kilowatts, à 50 périodes par seconde et 5 000 volts de tension.

Immédiatement ils entreprirent des essais avec un nouveau four de plus grandes dimensions, dans lequel ils obtinrent la flamme produite par environ 40 kilowatts. Ce four donna de bons résultats; la flamme était stable et constante, comme l'espéraient les savants norvégiens, ce qui les engagea à appliquer de plus grandes quantités d'énergie à un nouveau four, actionné par 60 à 80 kilowatts. Progressivement, ils arrivèrent à augmenter la dimension des fours, de manière à employer bientôt l'énergie de 120 et de 200 kilowatts. Il fallut alors transporter les installations de recherches à Vasmoën, près Arendal, dans un site charmant que représente la figure 12. A Vasmoën, Birkeland et Eyde pouvaient disposer régulièrement de 500 kilowatts, et pendant un temps limité, le dimanche par exemple, de 1 000 kilowatts.

Le développement successif des installations expérimentales est résumé dans le tableau ci-dessous :

DATES	LIEUX DE L'INSTALLATION	FORCE MOTRICE employée
		chevaux
Juillet 1903. . .	Fabrique de Frognerkillens. . .	25
Octobre 1903 . .	— Ankerlökken. . . .	150
Septembre 1904.	— Vasmoën.	1 000
Mai 1905. . . .	— Notodden.	2 500

En 1907, l'usine de Svaelgfos-Notodden fonctionnera avec 30 000 chevaux.

Les essais furent commencés à Vasmoën en septembre 1904. Au début, Birkeland et Eyde se proposaient seulement d'arriver, à Vasmoën, à construire un four de 500 kilowatts. Mais, peu à peu, la station fut agrandie et elle est aujourd'hui admirablement installée et outillée, aussi bien pour les recherches chimiques que pour les essais électriques. Vasmoën est devenu, dans les deux directions, un établissement modèle pourvu des instruments les plus perfectionnés et des moyens d'études les plus complets, ainsi que nous avons pu en juger, M. Schlœsing et moi, lors de notre visite en juillet dernier.

C'est à Vasmoën qu'on a construit les premiers fours de grandes



Fig. 12. — Station de Vasmoën, près Arendal.

dimensions, comme je viens de le dire (voir fig. 7). Voici comment, dans sa conférence de Christiania, M. Eyde a décrit le dispositif du four de Vasmoën :

L'air destiné à alimenter la flamme pénètre par les parois latérales, en terre réfractaire, de la chambre à flamme. Le système magnétique consiste en deux puissants électro-aimants dont les pôles sont dirigés de chaque côté de la chambre à flamme, laissant libre entre eux un espace de 10 centimètres environ (fig. 13).

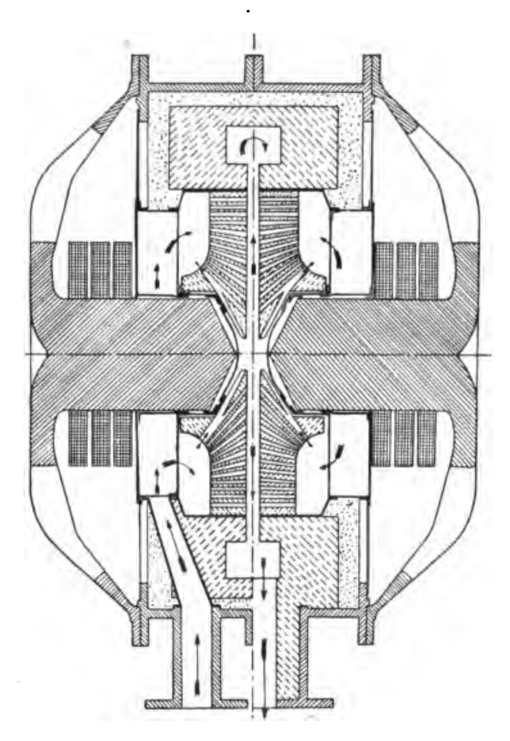


Fig. 13. — Coupe schématique du four Birkeland-Eyde.

La fermeture du courant magnétique consiste en caisses formées de plaques de fonte qui enveloppent le four extérieurement.

Les gaz nitrés, formés dans la flamme, s'échappent par un canal d'adduction périphérique revêtu, comme la chambre à flamme, de parois réfractaires. Ce four est en fonction continue depuis plus d'un an : il a atteint un degré de stabilité tel que, pendant des semaines, sans qu'aucun réglage soit nécessaire, il a été maintenu en marche avec une flamme produite par environ 300 kilowatts, sans variations d'énergie dépassant quelques pour-cent.

Point important, l'entretien et la réparation du four sont très simples, les organes les plus importants, les électrodes, ne devant être changés que chaque trois ou quatre semaines et le garnissage réfractaire que tous les quatre à six mois.

Les autres parties du four n'ont nécessité, pendant la durée de

fonctionnement que je viens d'indiquer, aucune modification ni réparation, ce qui montre combien est grande la durée des différents appareils électriques, transformateurs et autres, utilisés pour la marche du four.

Dans l'été de 1905, on a construit et mis à l'essai à Vasmoën un four d'un type entièrement nouveau, à flamme horizontale. Dans ce dispositif, l'accès de l'air a lieu d'un côté du four, le départ des gaz traités par la flamme se faisant du côté opposé. Les expériences n'étant pas terminées, il n'y a rien de plus à dire de ce four. (La photographie (fig. 5) représente la flamme de ce four horizontal.)

Quelle est la température des gaz incandescents dans l'intérieur du four? Quelles réactions accompagnent l'oxydation de l'azote? Tels sont les deux points que M. Eyde a abordés avec détails dans la remarquable conférence qu'il a faite le 5 décembre dernier à Christiania [1]. Je ne puis mieux faire que de demander à la communication de M. Eyde des explications sur ces deux points importants.

« Nous avons lieu d'admettre, a dit Eyde, que la température de nos fours à flamme dépasse 2 500°, lorsqu'ils fonctionnent dans des conditions convenables. De combien la température produite dépasse-t-elle réellement ce nombre, nous ne le savons pas ; peut-être atteint-elle 3 000° ou 3 500°. On a d'ailleurs des moyens de faire varier la température, soit par le changement de l'excitation, soit par l'élargissement de la chambre à flamme.

« En marche normale, la température des gaz, au sortir des fours électriques, varie entre 500° et 750°. Les oscillations de température, entre ces limites, sont sans influence sur le rendement net en acide nitrique par kilowatt-an, qui se maintient pratiquement constant. Si, comme exemple, on évalue, en moyenne à 3 000°, la température dans la flamme et à 600° celle des gaz sortant du four, il en résulterait qu'un cinquième seulement, environ, des quantités d'air traversant le four aurait subi l'action directe de l'arc incandescent. Les quatre autres cinquièmes du volume d'air insufflé doivent vraisemblablement

1. *Norsk Salpeterindustri, pà grundlag of Birkeland-Eyde's electrokemiske proces ai KR Birkeland og S. Eyde* (*Norsk tidsskrift for haandværk og industri og Teknisk ugeblad.* — Kristiania, 1905).

servir à refroidir rapidement l'air traité, pour le ramener à une température à laquelle la rapidité de la réaction qui décompose (dissocie) l'oxyde d'azote est pratiquement réduite à rien ([1]).

« L'expérience nous a appris, ajoute S. Eyde, que la température des gaz, à leur sortie du four, ne doit jamais être inférieure à 600°. Il est nécessaire que ces gaz soient refroidis presque instantanément.

« L'avantage de l'insufflation de l'air dans le four, réalisée par notre système, repose précisément sur ce fait que l'air se répand des deux côtés du four, dans toute l'étendue de la flamme, à un état de grande division.

« En ce qui concerne les processus chimiques dont le four est le siège, nous pouvons nous les représenter d'une manière simple en nous appuyant sur les considérations de la thermo-chimie et en admettant, *a priori*, qu'il ne s'agit, dans nos arcs lumineux, que d'un échauffement intense de l'air. Nous tenons cependant pour vraisemblable que le phénomène électrique joue, par lui-même, un certain rôle et que l'air, au contact immédiat du courant, ne doit plus être identique à l'air ordinaire simplement échauffé.

« Si l'on mélange 1 kilogr. d'oxygène avec 3 kilogr. d'azote, le mélange, d'après les conceptions de la chimie moderne, ne doit plus consister exclusivement en oxygène et en azote : il se forme spontanément des combinaisons chimiques de ces éléments, entre autres de l'oxyde d'azote. Dans ce cas, l'oxyde d'azote formé à la température ordinaire est, en réalité, en quantité qui échappe à toute mesure. Calculée d'après la loi de Guldbéry-Waage, cette quantité serait de un dix-millionième de milligramme $\left(\frac{1}{10\,000\,000}\right)$.

« Si, au contraire, la température s'élève à 1 000°, 1 500°, 2 000°, 2 500°, on peut déceler, à chacune de ces températures, une quantité d'oxyde d'azote mesurable ; il se produit, en quelque sorte, à chacune de ces températures, un état d'équilibre ; à 3 000°, la proportion d'oxyde d'azote dans le mélange n'est pas moindre de 5 °/₀.

1. Les gaz directement électrisés suivent la direction de l'étincelle avec une vitesse de 100 mètres, au moins, à la seconde et traversent l'air froid environnant qui très souvent reste à une température bien inférieure.

« On admet qu'à chaque température correspond incessamment la formation et la décomposition de l'oxyde d'azote (AzO) dont le résultat est de maintenir constante, dans le mélange des gaz, la proportion de ce composé.

« Si le mélange gazeux qui, à la température de 3 000°, renferme 5 °/₀ d'oxyde d'azote, est refroidi *lentement* jusqu'à 500°, sa teneur en ce gaz diminue avec la température et devient à peu près nulle à 500°. Si, au contraire, le refroidissement est ***brusque***, il se produit ce fait remarquable que le taux de 5 °/₀ se maintient, l'oxyde d'azote n'ayant pas eu le temps de se décomposer, et lorsque la température du gaz s'est abaissée jusqu'à 500°, ses modifications se produisent si extraordinairement lentement que les 5 °/₀ d'oxyde d'azote persistent finalement.

« Un semblable refroidissement instantané de l'air fortement échauffé se produit dans notre four. De ce que nous avons dit précédemment, résulte cependant que l'oxyde d'azote doit avoir dans l'arc un haut degré de concentration qui explique comment, après sa dilution, il renferme encore le nombre notable de milligrammes que nous avons constaté. En effet, pendant le fonctionnement du four durant plusieurs jours, la température des gaz à la sortie étant maintenue à 700°, le rendement en acide nitrique (AzO^3H) a été, par litre de gaz, à 0° et à 760, de 30 milligrammes.

« On peut aisément évaluer le pourcentage en volume de l'oxyde d'azote (AzO) formé dans l'arc lumineux, en admettant, pour sa température, 3 000° et en appliquant à sa composition les nombres que le professeur Nernst, par exemple, a donnés sur la concentration de l'oxyde d'azote à différentes températures.

« Une teneur de 30 milligrammes d'AzO^3H, par litre de gaz, correspond à un volume, pour cent, de 1,06 AzO, dans les gaz sortant du four, représentant 4,58 °/₀ d'AzO, en volume, dans la flamme de l'arc.

« Pour une température ***absolue*** de 3200°, Nernst a mesuré un volume, pour cent, d'oxyde d'azote d'environ 5. Par le calcul, il a trouvé 4,4, valeurs correspondant très bien au volume pour cent, de 4,58, que nous avons établi.

« Nos fours donnent donc le plus haut rendement qu'on puisse, d'après Nernst, atteindre théoriquement dans une flamme à 3 000°. »

Cette citation, empruntée à M. S. Eyde, vous fait connaître, dans ce qu'il a d'essentiel, le principe du four électrique que je vais avoir l'honneur de faire fonctionner sous vos yeux.

Ce four, élément fondamental de la découverte de Birkeland et Eyde, une fois imaginé et construit, ne constituait qu'une partie de l'invention ; il fallait, en effet, imaginer et réaliser une méthode et des appareils d'absorption capables de recueillir l'oxyde d'azote formé dans l'arc lumineux du four et de le transformer, avec le rendement le plus élevé possible, en acide nitrique. Ce n'était pas là chose facile, si l'on réfléchit à la quantité minime d'oxyde d'azote que renferme l'air sortant des fours. Je ne pourrais, sans sortir des limites assignées à cette causerie, vous décrire les longues et ingénieuses expériences, commencées à Frognerkillens et poursuivies à Ankerlökken, pour arriver à un moyen pratique de retenir l'oxyde d'azote dilué dans un volume d'air énorme, de le transformer en acide nitrique et de concentrer celui-ci de manière à en rendre l'emploi possible.

Il me suffira de vous signaler l'habileté et la persévérance avec lesquelles les savants norvégiens ont abouti, au milieu des difficultés pratiques que connaissent tous ceux qui ont tenté de faire passer, du laboratoire à l'usine, une réaction ou un procédé nouveaux.

Le problème a reçu une solution complète. Depuis le mois de mai 1905, la production d'acide nitrique par la combinaison des éléments de l'air, la récolte de cet acide et sa transformation en nitrate de chaux sont devenues industrielles à l'usine de Notodden, dont il me reste à vous faire connaître, à grands traits, l'agencement, le fonctionnement et les produits.

La fabrique de Notodden occupe quatre bâtiments situés en prolongement les uns des autres, comme le montre la figure 14, savoir (de droite à gauche).

1° Bâtiment des fours, près duquel se trouvent les tours d'oxydation dont nous allons parler ;

2° Bâtiment des tours d'absorption, où s'effectue la production d'acide nitrique ;

3° Bâtiment de fabrication du nitrate de chaux ;

4° Magasin. Emballage et expédition du nitrate. — Port.



Fig. 14. — Vue générale de l'usine de Notodden (1905).

L'usine est traversée dans toute sa longueur, à partir du hall des tours d'absorption, par une voie ferrée qui met en communication facile et économique toutes les parties de la fabrique. Les rails se prolongent au dehors du magasin jusqu'au petit port où les produits sont embarqués directement, sur le fjord d'Hitterdal, pour les divers points des côtes de Norvège ou pour le continent.

Bâtiment des fours. — L'installation électrique comprend trois fours identiques (fig. 15), quant à leur construction générale, au four de 300 kilowatts de Vasmoën que nous avons vu fonctionner, M. Th. Schlœsing et moi, avec le plus grand intérêt, à notre arrivée en Norvège, avant d'étudier les installations de Notodden.

A Notodden l'énergie des fours a été portée à 500 et 700 kilowatts, soit 700 à 1 000 chevaux, pour chacun d'eux. On a même pu élever, dans les derniers temps, l'énergie de l'un des fours à 1 500 chevaux, à titre d'essai comparatit : mais Birkeland et Eyde ont constaté qu'il est préférable, dans une exploitation régulière, d'employer des quantités d'énergie plus faibles, ne dépassant pas, par four, 500 à 600 kilowatts. Dans ces conditions, ils ont reconnu que les fours fonctionnent avec les mêmes sûreté et régularité de marche que le four à 300 kilowatts de Vasmoën.

L'énergie électrique nécessaire à la fabrication de Notodden est fournie, en location, au prix de 32 fr. par kilowatt-an, par l'usine voisine de Tinnfos, où on a installé, à cet effet, un générateur de 2 000 kilowatts, en triphasé, à la tension de 5 000 volts. Les trois fours de Notodden ont été, pour leur fonctionnement normal, branchés sur le générateur de Tinnfos et chacun d'eux emploie 500 kilowatts. La figure 15 représente, vue de face, l'installation des fours électriques.

L'air envoyé dans les fours, par des ventilateurs, les traverse à raison de 25 000 litres par minute, soit, pour les trois fours, 75 000 litres (75 mètres cubes par minute) ; il arrive dans le champ magnétique par les parois du four en terre réfractaire (voir fig. 13, coupe du four).

L'air mélangé aux gaz nitrés produits dans les fours en sort par un canal collecteur unique à une température variant entre 500 à 700°, température beaucoup plus élevée que celle que les gaz doivent avoir dans les autres appareils destinés à la production finale de



Fig. 15. — Salle des fours électriques à Notodden (1905).

l'acide nitrique. Les gaz traversent d'abord une chaudière tubulaire, où ils se refroidissent jusqu'à 200° (voir fig. 16). La vapeur produite est utilisée pour la concentration des dissolutions de nitrate de chaux dont il sera question plus loin. De cette chaudière, ils sont envoyés dans des appareils réfrigérants qui abaissent rapidement leur température à 50 ou 60°, température la plus favorable aux réactions d'où résulte la formation de l'acide nitreux. Ces réfrigérants sont respectivement placés au sommet des deux grandes tours où l'oxydation de l'azote se poursuit.

Dans le champ magnétique du four, il ne se forme qu'une seule combinaison azotée, l'oxyde d'azote, correspondant à la formule AzO : sa proportion s'élève, dans l'arc, à 5 °/₀ environ du volume total des gaz. Aux hautes températures de 2000°, 2500°, comme je l'ai dit, les éléments de cet oxyde se séparent et se recombinent incessamment, de sorte que le taux pour cent d'oxyde d'azote demeure constant dans le mélange.

Tours d'oxydation. — Ces grands réservoirs en tôle, reliés par des conduites aux fours électriques, sont au nombre de deux à Notodden ; ils sont cylindriques et garnis intérieurement d'un revêtement inattaquable par les acides. Dans ces tours se poursuit l'oxydation de la combinaison azotée produite dans les fours; après un court séjour dans ces appareils, l'oxyde d'azote (AzO) se transforme en peroxyde (acide nitreux) [AzO^2]; au sortir de ces réservoirs, les gaz nitreux sont envoyés par un ventilateur dans les *tours d'absorption*, où ils se transforment en acide nitrique.

Dans les tours d'oxydation, l'oxyde d'azote a passé, en se combinant à l'oxygène, à l'état de vapeur nitreuse (peroxyde d'azote), ce que représente l'égalité suivante :

$$\underset{\text{Oxyde d'azote}}{AzO} + \underset{\text{Oxygène}}{O} = \underset{\text{Acide nitreux}}{AzO^2}$$

La présence de l'eau est nécessaire pour transformer, en acide nitrique, les vapeurs nitreuses, d'après la réaction suivante :

$$\underset{\text{Acide nitreux}}{2\,(AzO^2)} + \underset{\text{Eau}}{H^2O} = \underset{\text{Acide nitrique}}{AzO^3H} + \underset{\text{Acide nitreux}}{AzO^2H}$$

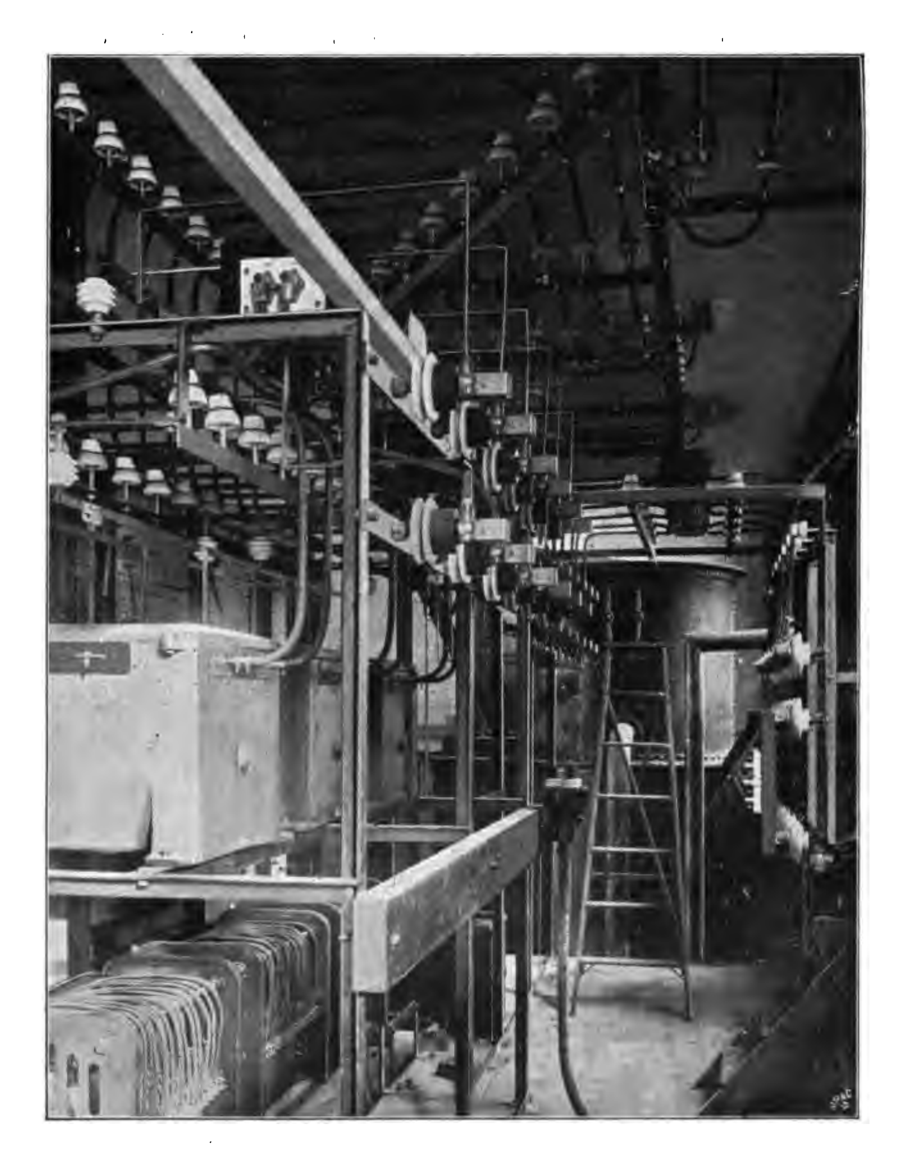


Fig. 16. — Tableau de distribution électrique à l'usine de Notodden.
Chaudières tubulaires pour l'utilisation de la chaleur des gaz.

En même temps que se forment de l'acide nitrique et de l'acide nitreux, il se produit des oxydes inférieurs d'azote,

$$(2\,AzO^2H) = AzO^2 + AzO + H^2O)$$

qui s'oxydent de nouveau pour continuer la réaction fondamentale; c'est dans les tours d'absorption que s'effectuent ces transformations.

Tours d'absorption. — Elles sont prismatiques : elles ont 4 mètres carrés de section et 10 mètres de hauteur; leur capacité est donc de 40 mètres cubes. Elles sont disposées de chacun des côtés du hall en deux rangées parallèles, chaque rangée comprenant deux tours en granit et deux tours en grès, remplies de morceaux de quartz de la grosseur du poing environ, jusqu'aux deux tiers de leur hauteur. A l'intérieur de ces tours circulent, en sens inverse, d'une façon continue, les gaz et de l'eau. Cette eau, qui humecte constamment le quartz, se charge progressivement de l'acide nitrique formé ; les autres produits azotés, moins oxydés, qui accompagnent sa formation, se réoxydent dans les tours, au contact de l'oxygène de l'air et donnent de nouveau de l'acide nitrique, comme je viens de le rappeler. Finalement, lorsque la solution d'acide nitrique produite dans les tours a atteint, à la suite de contacts réitérés des gaz et de l'eau, une concentration de 50 °/₀ (50 kilogr. d'acide nitrique monohydraté par 100 litres de liquide), elle est recueillie dans des cuves ouvertes, en granit, et provisoirement emmagasinée. Nous verrons tout à l'heure comment on l'emploie à la fabrication du nitrate de chaux.

Des tours en granit et en grès où circulent, en sens inverse, de l'eau et les gaz sortant des tours d'oxydation, on retire la plus grande partie des produits nitrés, transformés en acide nitrique monohydraté, dissous dans l'eau. Mais il importe beaucoup de ne pas laisser perdre les produits nitrés qui, ayant échappé à l'absorption dans ce système de tours, se trouvent encore en quantité notable dans les gaz sortant de la dernière tour en grès. Pour les recueillir, on a recours, à Notodden, à un absorbant énergique, le lait de chaux. A cet effet, il existe une cinquième tour en bois, de même dimension



Fig. 17. — Tours d'absorption de Notodden.



Fig. 18. — Appareils de distribution de l'eau, de l'acide et du lait de chaux, au sommet des tours d'absorption.

que les quatre premières, remplie de briques disposées en chicanes, et sur lesquelles circule, méthodiquement distribué, du lait de chaux. Les gaz nitreux sont retenus par la chaux et donnent naissance à un mélange de nitrite et de nitrate de chaux.

Ce mélange est ensuite dédoublé, à l'aide d'acide nitrique, en nitrate de chaux et en acide nitreux gazeux, qu'on réintroduit dans le sytème d'absorption précédemment décrit. Ce dédoublement correspond aux réactions suivantes :

$$Ca(AzO^2)^2 + AzO^3H = Ca(AzO^3)^2 + H^2O + AzO^2 + AzO$$

Enfin, pour compléter l'opération et retenir le reste des gaz nitrés qui s'échappent encore de la tour à lait de chaux, on leur fait traverser une dernière tour, d'un peu plus petite dimension que les autres, contenant de la chaux vive ; c'est seulement à la sortie de cette dernière tour que les gaz qui ont traversé tout le système d'oxydation depuis leur entrée dans le four électrique, sont rejetés dans l'atmosphère.

L'ensemble des opérations que je viens de décrire permet de transformer, finalement, en une solution d'acide nitrique pur à 50 °/₀, 95 °/₀, au moins, de l'oxyde d'azote produit dans le four électrique, résultat très remarquable pour une opération industrielle et que nous avons pu vérifier, M. Schlœsing et moi, en faisant l'analyse comparative des gaz sortant du four et de ceux que la tour à chaux vive renvoie dans l'atmosphère.

Fabrication du nitrate de chaux. — La figure 19 représente le hall où s'effectue l'attaque du calcaire par l'acide nitrique et la concentration du nitrate de chaux ainsi produit.

Voici quelles sont la marche et la succession des opérations. La dissolution de nitrate de chaux pur, provenant de la décomposition du mélange de nitrate et de nitrite dont je viens de parler, est amenée, ainsi que l'acide nitrique à 50 °/₀, dans une rangée de cuves ouvertes, en granit, contenant des morceaux de calcaire, de 13 à 20 centimètres de diamètre. Le carbonate de chaux est employé en quantité convenable pour neutraliser complètement la dissolution acide et donner naissance à du nitrate de chaux neutre. Cette opération est conduite



Fig. 19. — Cuves en granit pour la saturation de l'acide nitrique par le calcaire.



Fig. 20. — Emballage et expédition du nitrate de chaux.

méthodiquement dans quatre cuves superposées. Sur le calcaire neuf, on fait arriver la dissolution presque neutralisée; l'acide neuf est mis en contact avec les résidus du calcaire qui n'a pas été dissous dans la première attaque. Par suite de leur superposition, les liquides des cuves se déplacent l'un par l'autre automatiquement, et, finalement, on obtient une dissolution de nitrate de chaux neutre que l'on conduit dans une cuve d'évaporation en fonte.

La concentration de ce liquide se fait, partie à l'aide de la vapeur provenant de la chaudière destinée à refroidir les gaz sortant des fours, comme je l'ai dit précédemment, partie directement. On amène la solution de nitrate à une concentration telle que son point d'ébullition soit 145°, concentration qui donne un liquide contenant 75 à 80 °/₀ de nitrate de chaux, renfermant 13,2 à 13,5 °/₀ d'azote. La matière est versée dans des tonneaux en tôle, de 200 litres de capacité environ (voir fig. 20), où elle se solidifie par refroidissement. Le nitrate peut être expédié à cet état ou pulvérisé.

Au lieu d'évaporer le nitrate de chaux jusqu'à ce que le liquide ait atteint le point d'ébullition de 145°, on peut, comme nous l'avons vu pratiquer à l'usine d'essais de Vasmoën, le laisser cristalliser, après avoir évaporé la solution jusqu'à la température de 120° seulement. On centrifuge la dissolution concentrée de nitrate de chaux; les cristaux séparés de leur eau-mère peuvent être livrés à cet état.

Enfin, on fabrique encore à Notodden du nitrate de chaux basique, en ajoutant à chaud à la dissolution, une proportion convenable de chaux vive; après refroidissement, on broie le produit et on le tamise. Ce nitrate basique renferme 10 °/₀ d'azote, environ.

On pourrait, cela va sans dire, fabriquer, par les procédés que nous avons décrits rapidement, des nitrates de soude ou de potasse au lieu de nitrate de chaux. C'est le bon marché de la chaux, comparée à la soude, qui a déterminé, à Notodden, la transformation de l'acide nitrique en nitrate calcaire.

Il me faut maintenant, Mesdames et Messieurs, vous donner quelques indications sur l'importance des chutes d'eau dont dispose la Société norvégienne de l'azote, et sur les développements que la nouvelle industrie prendra à bref délai.

Comme vous avez pu en juger par la dépense d'énergie considérable que nécessite le fonctionnement des fours électriques, la production de l'acide nitrique et la fabrication du nitrate de chaux par les procédés Birkeland et Eyde sont subordonnées à la possibilité de mettre économiquement en œuvre des forces hydrauliques très puissantes, car on ne peut pas recourir à l'emploi beaucoup trop coûteux du charbon, pour produire l'énergie nécessaire à l'oxydation de l'azote atmosphérique.

La Norvège, par sa situation géographique, est particulièrement favorisée au point de vue de l'abondance des chutes d'eau météorique, dans toute la région ouest du pays. La côte ouest est tempérée par le courant du Gulf-stream qui lui apporte les effluves chauds du golfe des Antilles ; son atmosphère est chargée d'humidité ; elle se refroidit au contact des montagnes, ce qui amène des pluies abondantes.

Les fleuves et rivières qui coulent dans la partie méridionale de la Norvège, où se trouvent les chutes considérables dont la Société norvégienne de l'azote est propriétaire, prennent tous naissance dans la chaîne de montagnes qui longe la côte ouest. Dans cette région, les cours d'eau ont à parcourir de grandes distances pour arriver à la mer et la configuration du sol a produit, sur leur parcours, une succession de lacs très favorables à la régularisation de leur débit. Ces lacs forment des réservoirs naturels dans lesquels les eaux s'accumulent pendant la saison des hautes eaux et s'écoulent ensuite, lors des périodes de sécheresse, maintenant ainsi le débit des cours d'eau à peu près constant.

De tout temps, ces lacs et ces rivières ont été utilisés pour le transport des bois par flottage. Des dispositions spéciales permettent d'utiliser ces chutes d'eau dans les usines qui s'en servent : fabrique de pâtes à papier, de carbure de calcium, etc., même pendant les périodes de gelées intenses. Des syndicats se sont formés pour régulariser ces cours d'eau, c'est-à-dire pour effectuer les travaux nécessaires au maintien d'un débit d'eau à peu près constant.

Des quatre chutes acquises par la Société norvégienne, trois se trouvent dans la région méridionale ouest dont je viens de parler. C'est d'abord : *Schvælgfos,* que représente la figure 21, sur la rivière

Tinné, qui, en 1907, fournira l'énergie électrique à la nouvelle usine de Notodden. Cette usine, que la figure 22 représente en plan,



Fig. 21. — Chute de Schvälgfos sur la rivière Tinné.

comprendra l'installation de trente fours électriques. Sa production atteindra annuellement 20 000 à 25 000 tonnes de nitrate de chaux.

On a profité cet hiver de la saison des basses eaux pour effectuer

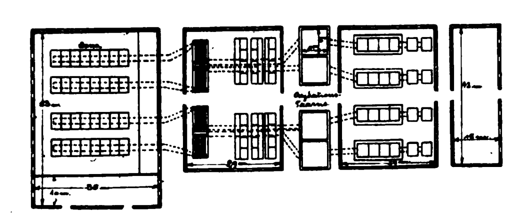


Fig. 22. — Plan de l'usine de Notodden, en 1907.

les travaux de régularisation de cette chute de 30 000 chevaux. Trois cents ouvriers travaillent à la construction du barrage presque

terminé aujourd'hui. Les figures 23, 24, 25 montrent diverses vues



Fig. 23. — Schvälgfos. Entrée du tunnel.

de ces grands travaux exécutés avec une célérité surprenante, sur-



Fig. 24. — Schvälgfos. Travaux du barrage.

tout si l'on réfléchit que la température s'est maintenue entre 20°

et 30° au-dessous de zéro pendant plusieurs semaines. La figure 26 représente le type des habitations construites pour les ouvriers. Au



Fig. 25. — Falaise au pied de laquelle est l'usine hydro-électrique de Schvälgfos.

point de vue hygiénique, comme sous le rapport du confort souhaitable, ces habitations ne laissent rien à désirer. A l'heure où nous



Fig. 26. — Barrage de Schvälgfos. Habitation ouvrière.

sommes, la chute a été détournée et l'on a construit le barrage et la conduite destinés à alimenter l'usine électrique qui fournira à

Notodden la force nécessaire à la nouvelle usine qui sera ouverte dans le courant de l'année 1907.



Fig. 27. — Rjukanfos.

La figure 27 représente la chute *Rjukanfos,* sur la rivière Mann, de beaucoup la plus importante, qui alimentera, dans un avenir prochain, l'usine de Saaheim.

La figure 28 représente la chute de Boilfos, au nord-ouest du port d'Arendal, sur la rivière Nidelven.



Fig. 28. — Boilfos.

La quatrième chute, *Wamma* (fig. 29), se trouve à l'est du fjord de Christiania, sur le Glommen, le fleuve le plus considérable de la



Fig. 29. — Wamma

Norvège, dont le bassin d'alimentation comprend 40 000 kilomètres carrés.

Vous jugerez de l'importance des forces électriques que ces quatre chutes peuvent fournir, en jetant un coup d'œil sur le tableau où

sont résumés, pour chacune d'elles, les volumes d'eau débités, la hauteur des chutes et le nombre de chevaux utilisables aux usines d'acide nitrique et de nitrate.

CHUTES	DÉBIT à la seconde	HAUTEUR de chute	FORCE en chevaux aux usines
—	—	—	—
	mètres cubes	mètres	
Svälgfos	65	46,5	26 500
Boilfos	50	57,0	23 500
Rjukan	45	520,0	202 500
Wamma	220	20,8	36 500
Au total (chevaux utilisables) . . .			289 000

D'après les estimations les plus sérieusement faites, le coût du cheval électrique-an ne paraît pas devoir dépasser le prix de 14 à 15 fr. (sans tenir compte des intérêts des capitaux engagés).

C'est donc près de 300 000 chevaux que la Société norvégienne pourra appliquer progressivement à la fabrication de l'acide nitrique et du nitrate de chaux, d'ici à quelques années. D'autre part, il y a lieu de penser que la découverte de Birkeland et Eyde recevra de nombreuses applications dans les pays du continent ou d'outre-mer qui possèdent tant d'abondantes sources de forces hydrauliques inutilisées jusqu'ici [1].

La production annuelle de nitrate de chaux, vous le voyez, prendra une place importante dans le commerce des engrais et assurera, dans l'avenir, l'accroissement des rendements des terres en culture.

---

1. En effet « les puissantes chutes d'eau n'existent pas qu'en Norvège ainsi que le rappelait M. Hitier, le 19 mars 1906, dans une intéressante communication à la Société des agriculteurs de France ; dans le Nouveau monde, le Canada en est abondamment pourvu : il en est de même en Europe, en Italie, en Autriche, en France.

Notre territoire, ajoutait M. Hitier, est même particulièrement favorisé, parce qu'une grande partie de son sol est montagneuse et que son climat est généralement humide. On tente en ce moment de procéder au recensement des forces hydrauliques de la France. MM. Tavernier et de La Brosse, chargés du service d'études des grandes forces hydrauliques de la région des Alpes, ont même déjà pu en donner une première approximation. Les quatre départements de la Haute-Savoie, de la Savoie, de l'Isère, des Hautes-Alpes possèdent une force hydraulique d'au moins un million de chevaux aux plus basses eaux — et, pendant six mois de l'année au moins, cette force se maintient entre deux millions et deux millions et demi de chevaux.

Est-il à dire que le nitrate du Chili ait à craindre, de la part du nitrate artificiel, une concurrence redoutable dans un prochain avenir? On ne saurait le penser, étant donnés, d'une part, les besoins si considérables de l'agriculture en engrais azotés, de l'autre, la proportion relativement faible de nitrate de chaux qu'on pourra obtenir, comparativement aux approvisionnements encore existants au Chili.

Je ne chercherai pas à évaluer, même approximativement, le prix de revient de la tonne de nitrate de chaux fabriqué par le procédé Birkeland et Eyde ; ce prix de revient dépendra, dans chacune des futures usines, de la valeur du terrain, des dépenses de construction, des frais de fabrication et d'administration ; en tenant compte, *exclusivement,* de la consommation d'énergie électrique, M. S. Thompson, partant du coût du cheval électrique, plus faible en Norvège que sur le reste du continent, évalue le prix de revient de la tonne d'acide nitrique monohydraté à 182 fr. 50 et celui de la tonne de nitrate de chaux à 13 °/₀ d'azote, à 112 fr. 50 [1]. A la dépense d'énergie électrique viennent nécessairement s'ajouter les frais de fabrication (achat du calcaire, outillage, etc.), l'intérêt et la rémunération du capital engagé, etc...

La production actuelle d'acide nitrique monohydraté à Notodden est comprise entre 500 et 600 kilogr. par kilowatt-an. La petite usine qui fonctionne depuis le 2 mai 1905 produit, par année, 730 000 kilogr. d'acide nitrique monohydraté.

En résumé, les cultivateurs de l'avenir sont assurés, en ce qui regarde l'azote, d'un approvisionnement pour ainsi dire illimité, l'air offrant à la nouvelle industrie une source inépuisable et gratuite de la matière première qu'elle met en œuvre.

Parmi les applications que les procédés Birkeland et Eyde peuvent recevoir, en dehors de la fabrication de l'engrais, il en est d'une importance capitale que je dois signaler rapidement à votre attention. La production économique de l'acide nitrique, appelée à rendre de si grands services pour la fabrication des produits nitrés qui constituent la base des explosifs (dynamite, poudres de diverses natures : guerre,

---

1. Conférence du professeur Thompson à la *Royal Institution* de Londres, 9 février 1906.

mines, picrates, etc.) assure aux pays dans lesquels les chutes d'eau rendent possible la mise en œuvre des procédés Birkeland et Eyde, la fabrication de tous les explosifs nécessaires à la défense nationale. Ces pays seront ainsi affranchis des importations du nitrate exotique, indispensable jusqu'ici pour la fabrication de l'acide nitrique et de la poudre.

Ces procédés ne sont pas moins intéressants pour la production des matières colorantes artificielles dont la consommation a pris, vous le savez, un développement colossal.

Les savants norvégiens se sont donc acquis un titre inoubliable à la reconnaissance de l'agriculture, de l'industrie et, j'ajouterai, de l'humanité, en assurant l'avenir de la production des denrées alimentaires, si étroitement liée à l'enrichissement du sol en principes azotés assimilables par les plantes.

MESDAMES et MESSIEURS,

Je suis ramené, au terme de cette causerie, trop longue peut-être à votre gré, à insister sur la valeur fertilisante du nitrate de chaux, l'un des points essentiels que je me suis proposé de traiter aujourd'hui.

Ainsi que j'espère vous l'avoir démontré en commençant, le nitrate de chaux qui se forme dans le sol, par suite de la nitrification des matières organiques azotées, est la source principale, presque exclusive, de l'azote de nos récoltes. La conséquence nécessaire de ce fait est que le nitrate de chaux, obtenu industriellement pour la première fois à Notodden, constitue un engrais de premier ordre.

Les expériences d'agronomes éminents, en tête desquels, dans l'ordre chronologique, j'ai rappelé Einhoff, H. Knopp de Münich, Hellriegel, ont établi depuis longtemps la valeur de ce sel pour l'alimentation des plantes.

Les essais de culture de végétaux dans des milieux artificiels, dont on règle à volonté la composition, ont montré que le nitrate de chaux suffit à tous les besoins de la plante en azote.

Des essais récents de culture faits à la station expérimentale de l'école d'agriculture de Christiania, et à la station de Darmstadt,

résulte l'équivalence nutritive, à dose égale d'azote, du nitrate de chaux et du nitrate de soude.

On peut entrevoir, dès à présent, une simplification dans la transformation des produits nitreux à l'usine de Notodden.

Cette simplification consisterait dans la suppression du traitement du mélange, sortant de la tour à lait de chaux que je vous ai décrite tout à l'heure, pour séparer le nitrate du nitrite formé dans cet appareil. On pourrait, alors, livrer directement à l'agriculture ce mélange de nitrite et de nitrate qui renferme 14 à 15 °/₀ d'azote. La question me paraît assez intéressante pour que je vous demande la permission de la préciser. Un préjugé assez répandu veut que les nitrites soient nuisibles à la végétation. Or, les travaux récents auxquels la nitrification du sol a donné lieu, les recherches de Winogradski en particulier, ont démontré, ainsi que vous le savez, qu'avant de devenir de l'acide nitrique, l'azote des matières organiques du sol passe, sous l'influence de microbes spécifiques, par des états intermédiaires, dont l'un est précisément l'acide nitreux.

La conclusion à tirer, *a priori,* de ce fait semble être que l'acide nitreux peut fournir à la plante, comme l'acide nitrique, l'azote dont elle a besoin et que, par conséquent, les nitrites, loin d'être nocifs pour la végétation, concourent, au même titre que les nitrates, à son développement.

Malgré son évidence, cette conception, pour être complètement justifiée, avait besoin de la sanction expérimentale.

Les essais de culture faits, au commencement du mois de juillet 1905, à l'École des manufactures de l'État par M. Th. Schlœsing et, par nous deux, au Parc des Princes, ont démontré l'exactitude de la double hypothèse que je viens de rappeler, à savoir : l'innocuité des nitrites et leur valeur comme aliment des plantes.

M. Th. Schlœsing a cultivé du maïs dans deux sols, exempts d'azote organique, dont l'un a reçu du nitrite, l'autre du nitrate du Chili ; les récoltes ont été égales, dans les deux cas, et l'analyse a montré l'identité d'assimilation de l'azote sous les deux formes.

En pleine terre, au champ d'expériences du Parc des Princes, le maïs s'est comporté identiquement dans les petites parcelles fumées les unes au nitrite, les autres au nitrate. Un essai d'épandage à

haute dose en couverture, de nitrite sur de l'orge, vers l'époque de l'épiage, n'a nui en aucune façon au développement de la céréale.

Nous sommes donc en droit d'affirmer, dès à présent, que le nitrite de chaux n'exerce aucune action nocive sur la végétation et qu'il lui apporte, au même titre que le nitrate, l'azote assimilable dont elle a besoin.

Des expériences sur une assez grande échelle sont présentement instituées chez plusieurs praticiens émérites, sur diverses cultures : céréales, betteraves, etc.

Au Parc des Princes, nous expérimentons comparativement, cette année, le nitrate de soude et les nitrate et nitrite de chaux de Notodden ; je serai heureux de rendre témoins de ces essais et de leurs résultats ceux d'entre vous, Mesdames et Messieurs, qui voudront bien, en juin, consacrer quelques instants à une visite au champ d'expériences.

J'ai la conviction que la campagne prochaine confirmera, dans les terrains variés où les expériences vont être instituées par d'habiles agriculteurs français, la haute valeur fertilisante du nitrate et du nitrite de chaux : il n'en saurait être autrement pour les raisons que je viens d'avoir l'honnreu de vous exposer. Il serait alors possible, on le voit, d'employer directement, comme engrais, le mélange de nitrite et de nitrate sortant de la tour à lait de chaux de Notodden.

Si j'ai eu la bonne fortune de pouvoir rompre la monotonie de cette causerie en vous faisant admirer la flamme étincelante qu'à l'instar de Prométhée les savants norvégiens ont su dérober au feu céleste par une voie détournée, je le dois à de précieux concours.

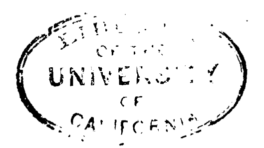
J'adresse tous mes remerciements : à la Société norvégienne de l'azote, qui a mis à ma disposition le four électrique qu'a fait fonctionner sous vos yeux un des ingénieurs distingués de Vasmoën, M. Bonnevie, venu exprès de Christiania ; au représentant de la Société norvégienne à Paris, M. de La Vallée-Poussin, et à M. Tresca, conservateur des collections du Conservatoire, qui ont mis à assister M. Bonnevie, dans les préparatifs de cette belle expérience, une obligeance extrême. Je salue enfin la présence, dans l'auditoire distingué qui m'entoure, de M. Samuel Eyde, qui, au milieu de ses nombreuses

occupations, n'a pas reculé devant le long parcours qui sépare Paris de Notodden.

Je m'arrête, Mesdames et Messieurs. Je m'excuse de vous avoir si longtemps retenus et je vous remercie de votre bienveillante attention à suivre les développements un peu arides qui m'ont semblé nécessaires pour mettre en relief, dans ses grandes lignes, la découverte capitale de MM. Birkeland et Eyde.

L'œuvre des éminents savants norvégiens justifie pleinement, vous le voyez, la prédiction de Sir William Crookes : « *Le laboratoire, avec le concours des forces hydrauliques, sauvera le monde de la famine* », et elle assure à ses auteurs la gratitude de l'agriculture contemporaine et la reconnaissance des générations qui succéderont à la nôtre.

Paris, 20 avril 1906. Station agronomique de l'Est.



Nancy, imprimerie Berger-Levrault et Cie.



NANCY. — IMPRIMERIE BERGER-LEVRAULT ET Cie

